

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ

На правах рукописи

ВАСИЛЬЧЕНКО ЯНА ВАСИЛЬЕВНА

УДК 621.9. 02: 658. 562

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ СТАНКОВ
С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки
и инструменты

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор,
Лауреат государственной премии Украины,
Ковалев Виктор Дмитриевич

Краматорск - 2016

СОДЕРЖАНИЕ

	с.
Введение	6
1 Пути повышения эффективности тяжелого металлорежущего оборудования	13
1.1 Анализ условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения	13
1.2 Банк данных о прецедентах обработки деталей тяжелого машиностроения	26
1.3 Анализ методов выбора определения рациональных конструктивных параметров тяжелого металлорежущего оборудования	28
1.4 Анализ методов определения рациональных параметров процесса резания на тяжелых станках	36
1.5 Системы адаптивного управления процессом резания на тяжелых станках	45
Выводы по главе 1 и постановка задач исследований	56
2 Методы исследований	59
2.1 Методика анализа условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения	59
2.2 Методы выбора определения рациональных конструктивных параметров тяжелого металлорежущего оборудования	78
2.3 Методы определения рациональных параметров процесса резания на тяжелых станках	81
2.4 Методика стойкостных эксплуатационных испытаний процессов обработки на тяжелых токарных станках	83
2.5 Методика проектирования мехатронных станочных систем	86
Выводы по разделу 2	95

3	Формирование базы знаний о механической обработке на станках в условиях тяжелого машиностроения	97
3.1	Анализ условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения	97
3.2	Формирование групп деталей типа тел вращения в зависимости от их сложности	105
3.3	Анализ обрабатываемых деталей и использования технологических возможностей станков	114
3.4	Режимы резания и использования станков по мощности	124
	Выводы по разделу 3	134
4	Методика проектирования тяжелых токарных станков с ЧПУ и оптимизация режимов их работы	136
4.1	Методика структурно-параметрического синтеза тяжелых токарных станков	136
4.2	Рекомендации по проектированию тяжелых токарных станков с ЧПУ	139
4.3	Критерии оптимизации и ограничения на управляемые параметры процесса механической обработки на тяжелых станках	145
4.4	Характеристики износостойкости режущего инструмента и обрабатываемости материалов	150
4.5	Теоретическое обоснование зависимости критического износа от условий резания	156
4.6	Экспериментальные исследования зависимости критического износа и интенсивности износа от условий резания	163
4.7	Определение скорости резания по стойкости и критерию затупления	174
4.8	Элементы систем искусственного интеллекта для автоматического управления процессами резания на адаптивном оборудовании	181

4.9 Результаты стойкостных испытаний	190
Выводы по разделу 4	204
5 Системы адаптивного управления процессом механической обработки на тяжелых станках с учетом состояния инструмента	205
5.1 Реализация законов управления режимами обработки на тяжелом токарном станке посредством PLC модулей	205
5.2 Системы ЧПУ для реализации адаптивного управления	206
5.3 Технические возможности ПЛК, интегрированного в системы управления HeidenhainTNC 320 и HeidenhainMANUALplus 620	209
5.4 Параметры регулирования процесса резания в адаптивных системах	210
5.5 Управление скоростью подачи по силе резания	211
5.6 Выбор средств измерения для практической реализации предложенной системы	226
5.7 Разработка системы адаптивного управления скоростью резания для обеспечения оптимального значения температуры в зоне резания	228
5.8 Оценка возможности реализации предложенного алгоритма на базе ПЛК системы управления HeidenhainMANUALplus 620	237
Выводы по разделу 5	240
6 Разработка гаммы тяжелых токарных станков нового поколения	241
6.1 Особенности конструкций тяжелых токарных станков	241
6.2 Разработка суппортов с адаптивными гидростатическими опорами	250
6.3 Разработка конструкций шпиндельных узлов	255
6.4 Основные технические данные и характеристики станков КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3	261
6.5 Устройство, принцип работы станков КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3 и их составных частей	269

6.6 Статическая жесткость и динамическая устойчивость станков	272
6.7 Долговечность, надежность и длительное сохранение точности	275
6.8 Оптимизация технических параметров станков	276
6.9 Совершенствование систем управления и эксплуатации станков, разработка новых адаптивных систем управления	278
6.10 Инновационные составляющие	280
6.11 Результаты внедрения работы на ПАТ НКМЗ и других предприятиях тяжелого машиностроения	284
Выводы по разделу 6	298
Общие выводы	299
Перечень ссылок	304
Приложения	323

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Тяжелое машиностроение занимает одно из ведущих мест в промышленности и экспортном потенциале Украины. Предприятия тяжелого машиностроения отличаются широкой номенклатурой, уникальными размерами и весом продукции, длительным циклом изготовления деталей, единичным и мелкосерийным характером производства, построением технологического процесса по принципу концентрации операций. Тяжелые станки являются основой технологического оборудования этой отрасли. Их суммарная стоимость столь значительна, что нерациональное конструирование и использование тяжелых станков ведет к большим экономическим потерям.

Необходимость обработки разнообразных деталей предопределяет широкую универсальность оборудования. Изготовление деталей весом в десятки и сотни тонн требует применения уникальных станков, представляющих характерную особенность данной отрасли машиностроения. Номенклатурный и количественный состав оборудования должен обеспечивать возможность выполнения заданий в условиях непрерывно изменяющихся объектов производства. Имея ограниченный объем выпуска изделий, необходимо находить пути совершенствования технологического процесса при установленном характере производства. В связи с этим возникает необходимость повышения серийности производства при заданном объеме выпуска.

Большинство исследователей при разработке конструкций станков и регламентов их эксплуатации ограничиваются рассмотрением лишь факторов процесса резания: элементов режима резания, свойств обрабатываемого и инструментального материала и т.п. При этом недостаточно учитываются особенности обработки деталей на тяжелых станках, связанные с масштабным фактором (обрабатываемые детали длиной до 24000 мм и более, диаметром до 5000 мм, массой до 250 тонн), конструкцией инструментов, большим рассеиванием параметров обработки, повышенной вероятностью разрушения

инструмента (до 45%), необходимостью учитывать надежность инструмента при обработке крупногабаритных и дорогостоящих деталей.

Отсутствие обоснованных требований к созданию тяжелых станков с программным управлением привело к тому, что выпускаемые станки имеют максимально возможные технологические возможности, т.е. ориентированы на обработку самых сложных деталей. Однако, опыт эксплуатации оборудования с программным управлением показал, что часть функций остается невостребованной. Необходимо разработать основы проектирования новых тяжелых станков с адаптивным управлением, ориентированных на потребности предприятий тяжелого машиностроения. Каждый станок должен реализовывать необходимое и достаточное число функций, т.е. иметь рациональные технологические возможности и потребительские свойства (стоимость, размеры и др.).

Очевидно, что выработка обоснованных требований к тяжелым станкам с адаптивным управлением возможна только на основе обобщения и исследования определенного множества характеристик деталей, изготавливаемых предприятиями тяжелого машиностроения.

Таким образом, для повышения эффективности тяжелого машиностроения необходимо решить актуальную научно-техническую проблему – разработать основы теории создания тяжелых станков с адаптивным управлением.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа выполнена в соответствии с научной тематикой кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Донбасской государственной машиностроительной академии ДК-03-2001 «Підвищення якості та ефективності верстатного обладнання та різального інструмента для важкого машинобудування» (№0102U001664); Д-04-2004 «Розробка системи управління якістю роботи важких верстатів та інструментів» (№0104U004038); Д-06-07 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (№0107U001306); ДК-08-04 «Удосконалювання технологічного середовища для автоматизованого виробництва продукції важкого машинобудування» (№0105U002445);

Д-06-2007 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (0107U001306); Д-05-2009 «Розробка інформаційних технологій для систем адаптивного управління процесом механічної обробки деталей на важких верстатах» (0109U002669); Д-03-2011 «Оперативна оптимізація процесів різання для систем адаптивного управління важкими верстатами нового покоління» (0111U000884); Д-03-2013 «Розробка технологічних систем для екологічно ефективної обробки деталей енергетики на базі адаптивних багатоцільових важких верстатів» (0113U000607); Дк-01-2014 «Підвищення надійності та продуктивності комп'ютеризованих мехатронних верстатострументальних систем важкого машинобудування» (0114U002757); Д-03-2015 «Управління процесами механічної обробки деталей вітроенергетики з нових важкооброблюваних матеріалів на важких верстатах» (0115U003124).

Цель и задачи исследований. Цель работы – разработка научных основ проектирования станков для обработки деталей тяжелого машиностроения на основе адаптивного управления.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить такие задачи:

1. Проанализировать особенности предприятий тяжелого машиностроения, номенклатуру обрабатываемых деталей, технологические процессы их изготовления, применяемое оборудование.
2. Создать базу знаний о прецедентах обработки деталей тяжелого машиностроения.
3. Разработать методологию структурно-параметрического синтеза тяжелых станков на основании созданной базы знаний.
4. Обосновать значимые параметры процесса резания и разработать математические модели для реализации системы адаптивного оптимального управления процессом механической обработки на тяжелых станках. Разработать нормативы режимов резания для тяжелых станков с ЧПУ.
5. Разработать схемы, принципы работы и конструкции мехатронных станочных узлов, измерительных и диагностических средств для реализации адаптивного управления.

6. Разработать и внедрить многоуровневую систему принятия решений с элементами искусственного интеллекта для автоматического управления процессами резания на адаптивном оборудовании.

7. Внедрить результаты исследований при разработке новой гаммы тяжелых токарных станков с ЧПУ.

Объект исследования – технологическая система тяжелого металлообрабатывающего станка.

Предмет исследования – закономерности создания тяжелых станков с реализацией адаптивного управления режимом работы при обработке деталей тяжелого машиностроения.

Методы исследований.

Методологической основой работы является комплексный подход к изучению процесса обработки деталей на тяжелых станках, их условий и особенностей, закономерностей процессов.

Теоретические исследования базируются на основных положениях теории резания материалов, теории проектирования металлорежущего оборудования, квалитметрии, теорий надежности, исследовании операций, принятия решений, теории вероятности и математической статистики.

Экспериментальные исследования базируются на теориях регрессионного и корреляционного анализов, математической статистики с использованием методик форсированных, ускоренных, длительных испытаний, моментных наблюдений, информационного банка, эвристических методов.

Работа выполнялась с помощью современных средств вычислительной техники.

Научная новизна полученных результатов.

Впервые разработаны научные основы создания тяжелых токарных станков с оптимальным управлением в режиме реального времени, реализующие концепцию повышения экологичности и эффективного использования ресурсов.

Впервые разработана информационная модель детали на основании базы знаний о работе тяжелого металлорежущего оборудования, применение

которой позволяет определять рациональные параметры тяжелых токарных станков на основании классификационных признаков обрабатываемых деталей.

Установлены критерии, целевые функции и ограничения для оптимизации режимов резания при создании нормативов резания для тяжелых станков с ЧПУ, которые впервые позволяют управлять процессом резания в режиме реального времени

Впервые разработаны информационные модели для реализации системы адаптивного оптимального управления процессом обработки на тяжелых токарных станках и многоуровневая система принятия решений с элементами искусственного интеллекта.

Практическое значение полученных результатов.

- Создан программно-математический комплекс для проектирования компоновки металлорежущих станков на основании статистического исследования параметров механообработки на предприятиях тяжелого машиностроения.

- Создана база знаний из прецедентов условий механической обработки на предприятиях тяжелого машиностроения.

- Обоснованы критерии и принципы создания и функционирования новых тяжелых станков с ЧПУ.

- Разработана информационная технология моделирования в реальном времени функционирования технологической системы с нормативами режимов.

- Выявлены значимые параметры и разработаны математические модели и программные комплексы для реализации системы адаптивного оптимального управления процессом экологически эффективной обработки на тяжелых токарных станках.

- Разработаны структурные схемы и конструкции мехатронных станочных узлов для реализации системы адаптивного управления тяжелым токарным станком.

- Разработаны рекомендации по проектированию новой гаммы тяжелых токарных станков с числовым программным управлением.

Реализация результатов работы.

На основании результатов исследований настоящей работы разработаны и внедрены в производство методика статистических исследований предприятий, критерии и принципы создания и функционирования новых тяжелых станков, системы адаптивного оптимального управления процессом экологически эффективной обработки на тяжелых станках, общемашиностроительные нормативы режимов резания для точения. Фактический экономический эффект от результатов внедрения работы ПАО НКМЗ составляет 361,7 тыс. грн.

Результаты работы внедрены при создании тяжелых токарных станков нового поколения, выпускаемых ПАО «Краматорский завод тяжелого станкостроения», разработаны и внедрены системы адаптивного управления и программные продукты для выбора регламентов эксплуатации тяжелых станков, которыми укомплектованы станки, при поставке их потребителю. Экономический эффект от внедрения их в расчете на 1 станок составляет 108 тыс. грн. Результаты работы внедрены также при реконструкции тяжелых токарных станков на ООО «Тяжстанкосервис» с экономическим эффектом 146 тыс. грн.

Результаты работы внедрены также в общемашиностроительных нормативах резания, которые прошли промышленную апробацию.

Результаты используются в лекциях, практических занятиях, курсовом и дипломном проектировании в ДГМА.

Личный вклад соискателя.

Все научные результаты получены соискателем самостоятельно. Соискатель осуществил научное обоснование разработок в области машиностроения, что обеспечивает решение важной прикладной проблемы – повышение эффективности обработки деталей тяжелого машиностроения за счет создания теории проектирования тяжелых станков рациональной конструкции с адаптивным управлением.

Постановка задач и анализ научных результатов выполнены вместе с научным консультантом и частично, с соавторами публикаций.

Апробация результатов диссертации.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на более 40 научных конференциях и семинарах, в том числе на международных: в г. Киеве (Международный научно-технический семинар «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении» – 2006, «Прогрессивная техника и технология машиностроения» – 2001), в Болгарии, г. Пловдиве («V international Conferens on Advansed Engeniaring.Technology – AMTEX 99, beyond 2000) – 2007, Черногории, г. Будва (2nd international Conferense ICQME). – 2007; 2012, Сербии, г. Врнячка Баня (9th International Conference “RADMI”) – 2007, 2009, 2011, 2012, 2013, (International conference “Research and development in mechanical industry”), 2010, 2011; в Тунисе (Les technologies modernes de l’industriemecanique et les problems de la formation des cadres d’ingenieurs. Recueild’ouvrages II Seminaire international scientifique et methodique)-2008; Польше, г. Ржешов (Mechanika. Z.77. Zeszytynaukowe Politechniki Rzeszowskiej) – 2009, в Харькове («Высокие технологии в машиностроении. Интерпартнер» – 2008), в Севастополе – Донецке (Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века, 2007), в Сумах («Современные технологии машиностроения» – 2001), во Львове («Прогресивні технології в машинобудуванні» – 2014), в Краматорске («Тяжелое машиностроение. Проблемы и перспективы развития» – 2002-2015.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 74 научные работы, в том числе 3 монографии, 29 статей в научных изданиях (из них 5 статей в изданиях иностранных государств, 3 статьи в отечественных изданиях, включенных в международных наукометрических баз данных), 1 патент на изобретение и 1 патент и полезную модель, 40 тезисов докладов в сборниках материалов конференций .

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав основной части, заключения, списка использованных источников – 167 наименований (19 стр.) и 4 приложений. Содержит 322 страницы, в том числе 110 рисунков, 36 таблиц.

1 ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯЖЕЛОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Производство тяжелого металлургического, энергетического, транспортного оборудования является основой машиностроения Украины и важной составляющей частью экспорта. Возможность изготовления тяжелых машин, конкурентоспособных на мировом рынке, обеспечивается оснащением машиностроительных предприятий современным станочным оборудованием. С развитием промышленности ужесточаются требования к машинам, повышается точность их изготовления, применяются новые марки материалов, которые дают возможность достижения нового уровня эксплуатационных характеристик.

1.1 Анализ условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения

Предприятия тяжелого машиностроения отличаются широкой номенклатурой, уникальными размерами и весом продукции, длительным циклом изготовления деталей, единичным и мелкосерийным характером производства, построением технологического процесса по принципу концентрации операций.

Специфические особенности тяжелого машиностроения не позволяют механически переносить прогрессивные методы технологии и организации, применяемые в крупносерийном и массовом производствах, на предприятия, производящие различные виды уникальных машин. Предприятия тяжелого машиностроения имеют свои особенности технологического цикла, которые обусловлены уникальностью оборудования и технологических процессов обработки на тяжелых станках [58,60,62-64, 117]:

- большие размеры обрабатываемых деталей (цилиндры, валы, штоки, бандажи длиной до 24000 мм, диаметром до 5000 мм, массой до 250 тонн и более);

- большие глубины резания и подачи;
- высокая стоимость заготовок;
- большой путь резания;
- высокие производственные затраты, связанные со стоимостью уникального оборудования и режущего инструмента;
- неравномерность припусков;
- сложности наблюдения и влияния на процесс резания, обусловленные эргономическими факторами;
- повышенные вибрации при резании и т.д.

Необходимость обработки разнообразных деталей предопределяет широкую универсальность оборудования. Изготовление деталей весом в десятки и сотни тонн требует применения тяжелых и уникальных станков, представляющих характерную особенность данной отрасли машиностроения. Номенклатурный и количественный состав оборудования должен обеспечивать возможность выполнения заданий в условиях непрерывно изменяющихся объектов производства.

Необходимо находить пути совершенствования технологического процесса при установленном объеме производства. В связи с этим возникает необходимость повышения серийности производства при заданном объеме выпуска.

Это достигается следующими мероприятиями [117]:

- 1) конструктивной нормализацией и унификацией деталей и узлов;
- 2) организацией группового запуска изготовления деталей, узлов и машин;
- 3) типизацией технологических процессов, нормализацией и унификацией технологической оснастки на базе разработки типовых и групповых технологических процессов;
- 4) централизацией технологической подготовки в соответствующих отраслевых отделах (главного технолога, главного металлурга, а при

необходимости и главного сварщика), что позволяет оказывать прямое влияние на три первых фактора.

В тяжелом машиностроении находят применение следующие виды заготовок:

- а) отливки из стали, чугуна и цветных металлов;
- б) поковки и штамповки, получаемые горячим способом;
- в) сварные детали и узлы;
- г) сортовой и листовой прокат черных и цветных металлов;
- д) пластмассы и железобетон.

По данным, приведенным в [117] наибольший объем по весу занимает стальное и чугунное литье, которое в среднем составляет 45-50%. Прессовые и молотовые поковки составляют примерно 17-18% и сварные узлы 22-24%.

В структуре производства предприятия тяжелого машиностроения все более возрастает доля деталей – тел вращения для современных машин.

Также изготавливаются другие детали: уникальные роторные валы (диаметр – 1600 мм, длина – 2500 мм, масса 7,7 т) для комплектации ветровых энергетических установок, как альтернативного направления, направленного на энергосбережение, в рамках крупного международного энергетического проекта по созданию ветровых электростанций для США, Германии, Голландии. Характеристики обрабатываемых деталей на тяжелых токарных станках для условий ПАО НКМЗ приведены в табл. 1.1.

На рис. 1.1 приведен перечень выполняемых технологических переходов и их относительная продолжительность. Примерно 80–90% всего времени расходуется на обтачивание наружных поверхностей, растачивание отверстий и подрезание торцовых поверхностей. Около 1% времени приходится на выполнение отделочных операций – шлифование и накатывание.

Табл.1.1. Номенклатура обрабатываемых валков на станках с наибольшим диаметром обрабатываемых деталей 2000 мм (над станиной)

Габаритные размеры валков Ø бочки/ L бочки/ L детали	Масса валков, т	Материал валков	Твердость бочки и шеек	Точность валков	Шерохо- ватость поверх- ности
1600x2700x6700 1500x2500x6300 1400x2000x5500 1200x1200x5000 1100x1500x4800	от 12 до 60	Ст50, 60ХН, 50ХН, 75Х2МФ, 75ХМФ, 90ХФ, 70ХЗГНМФ	Бочки и шеек до 320НВ Бочки от 60 до 85 HSD Шеек от 30 до 55 HSD	Биение бочки и шеек от 0,02мм до 0,005мм	от Ra3,2 до Ra0,4

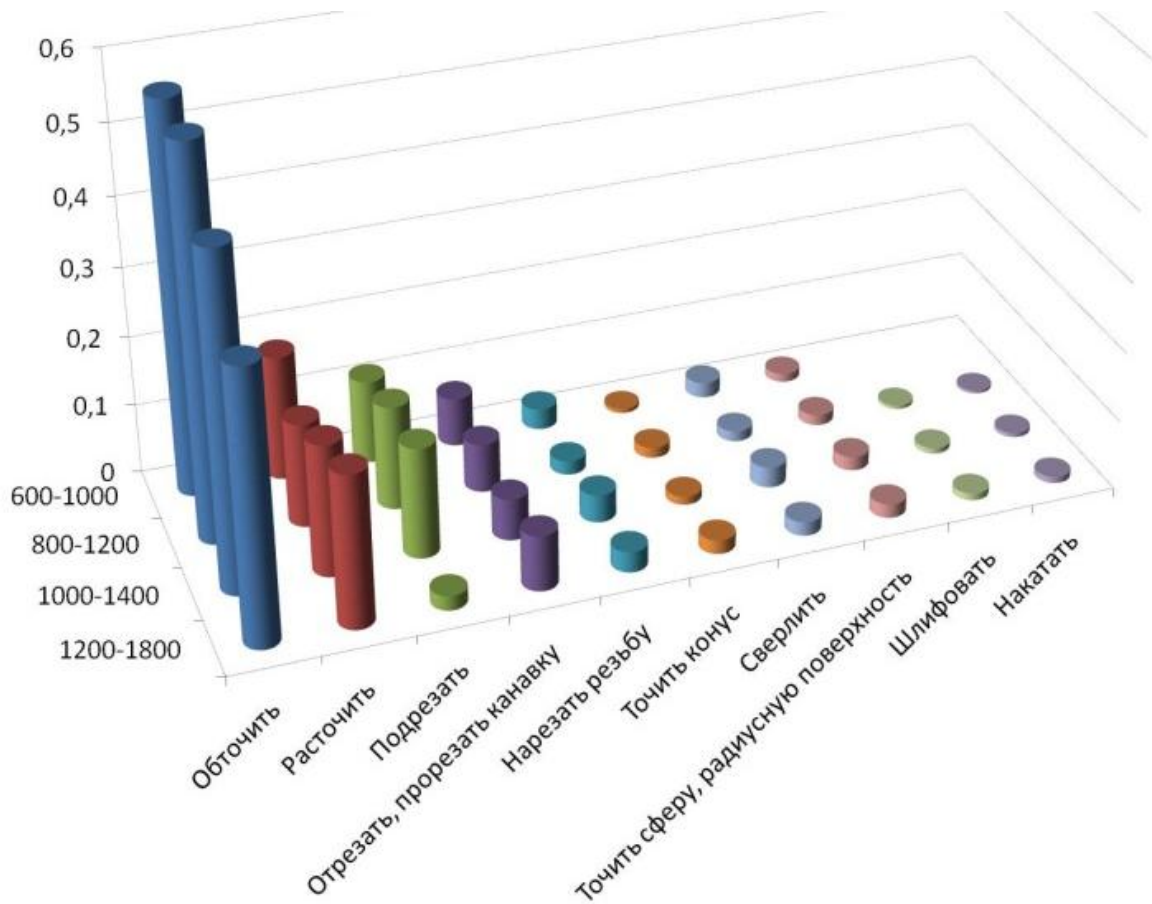


Рис. 1.1. Технологические переходы и их относительная продолжительность

Основная группа оборудования машиностроительных предприятий Украины – это токарные станки. На тяжелых токарных станках с числовым программным управлением производится механическая обработка широкой номенклатуры деталей, таких как прокатные валки, роторы турбин, колесные пары железнодорожного и горного транспорта, корабельные гребные валы и многое другое (рис. 1.2 – 1.5).



Рис.1.2. Крупногабаритный прокатный вал



Рис. 1.3. Черновая обработка вала ветрогенератора на ПАТ НКМЗ

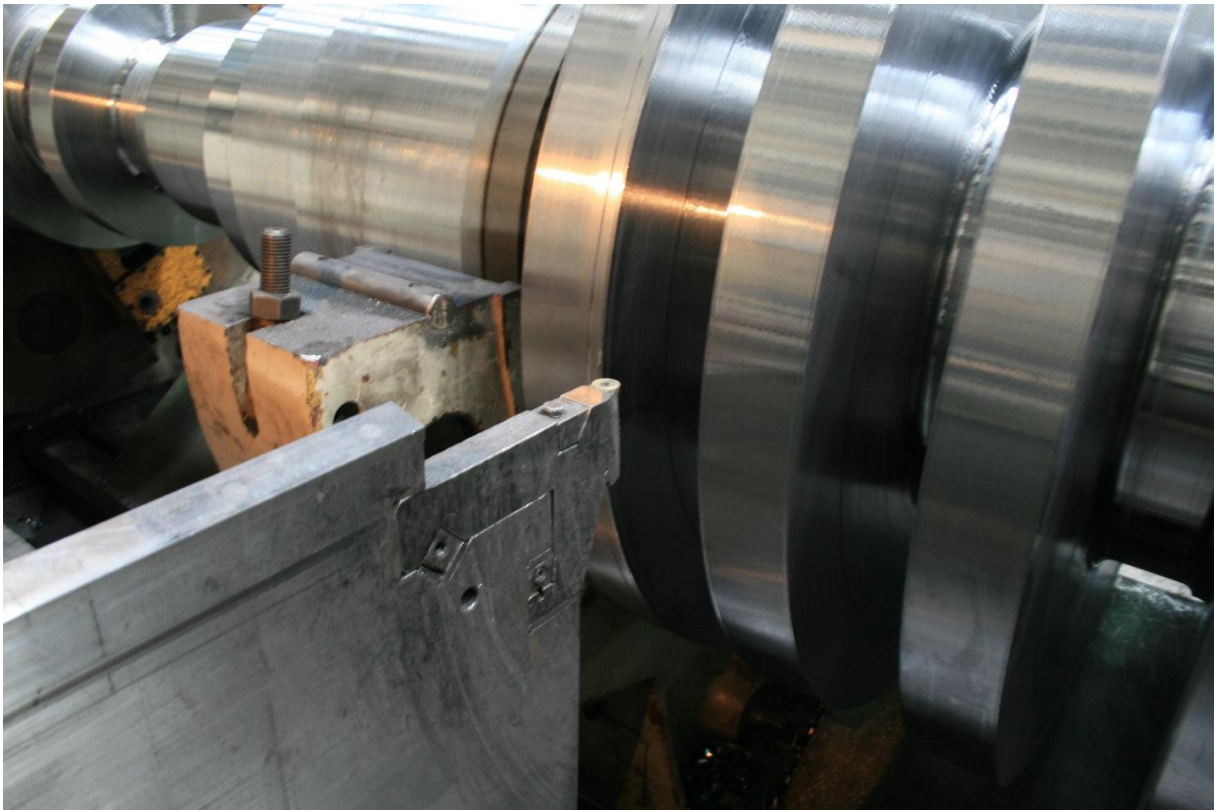


Рис. 1.4. Обработка ламельным резцом на тяжелом токарном станке



Рис. 1.5. Типовая деталь-представитель предприятия
тяжелого машиностроения

При обработке больших деталей часто нужны особые технические решения, не присущие другим областям машиностроения. Эти особенности вызывают необходимость исследования закономерностей обработки на тяжелых станках, управления процессами резания, обеспечения точности и работоспособности оборудования, повышения эксплуатационных свойств режущих инструментов. Дорогостоящее оборудование приносит экономический эффект только в случае гарантии его максимального использования.

Такие характерные особенности обработки деталей на тяжелых станках, большие материальные затраты на проведение экспериментальных исследований, не только сдерживают системный подход в исследованиях механической обработки деталей на тяжелых станках, но и требуют совершенно новых методологических решений, основанных на обработке статистических данных самого процесса.

Так, с целью установления параметров станков Соловьевым Л.Н. на основании статистических наблюдений исследованы параметры заготовки, фактические режимы резания, мощность на тяжелых токарных станках. В работе даётся общая характеристика особенностей обработки деталей на тяжёлых станках. Автор отмечает широкую номенклатуру и большие габариты деталей, обрабатываемых на тяжелых станках, низкий коэффициент оснащённости технологического процесса специальными приспособлениями, длительный цикл изготовления машин. Однако эти утверждения не подкреплены количественными оценками, так как не являются следствием специального статистического анализа условий обработки на тяжёлых станках и утратили актуальность в связи с их давностью.

В работах автора [36, 52] предпринята попытка исследования условий обработки детали на тяжелых станках с помощью статистического анализа на заводах различных отраслей промышленности. Изучались средние значения параметров, характеризующих условий обработки, и их распределение для каждого типоразмера станка. Рассматривались тяжелые токарные станки

размерно-конструктивного ряда, выпускаемого Краматорским заводом тяжелого станкостроения (КЗТС) с наибольшим диаметром устанавливаемого над станиной изделия $D_C = 1250 \dots 4000$ мм. Менее подробно анализировались условия обработки на станках с $D_C = 1000$ мм. На станках с $D_C = 150 \dots 630$ мм параметры условий обработки исследовались для сравнения с условиями обработки на тяжелых станках.

Математическая обработка статических данных об условиях обработки на тяжелых токарных станках, приведенная в работах Клименко Г.П. [53-54], показала, что распределение всех параметров, в том числе и характеристика заготовок, подчиняется логарифмически - нормальному закону.

Плотность вероятности распределения в этом случае определяется:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_1 y} \phi_0 \left(\frac{\lg y - \lg y_0}{\sigma_1} \right) = \frac{M}{\sigma_2 y} \phi_0 \left(\frac{\ln y - \ln y_0}{\sigma_2} \right), \quad (1.1)$$

где σ_1, σ_2 – параметры закона распределения, связанные между собой зависимостью $\sigma_2 = M\sigma_1$; $M=0,4343$ – коэффициент перехода от натуральных к десятичным логарифмам.

Максимальное значение параметров распределения условно принималось равным максимальному значению соответствующего параметра, встречающегося в информационном массиве банка данных. Например, на рис. 1.6 D_{\max} обозначены наибольшие значения диаметров заготовок, зафиксированные при сборе статистической информации на станках данного типоразмера.

Например, область широкого применения длин заготовок занимает 80% площади плоской фигуры (рис. 1.7.), ограниченной кривой плотности вероятности и осью длин L .

Ординаты, ограничивающие указанную область, соответствуют минимальному ($L_{\min} = 0,8$) и максимальному ($L_{\max} = 0,8$) значению длин заготовок с вероятностью 0,8.

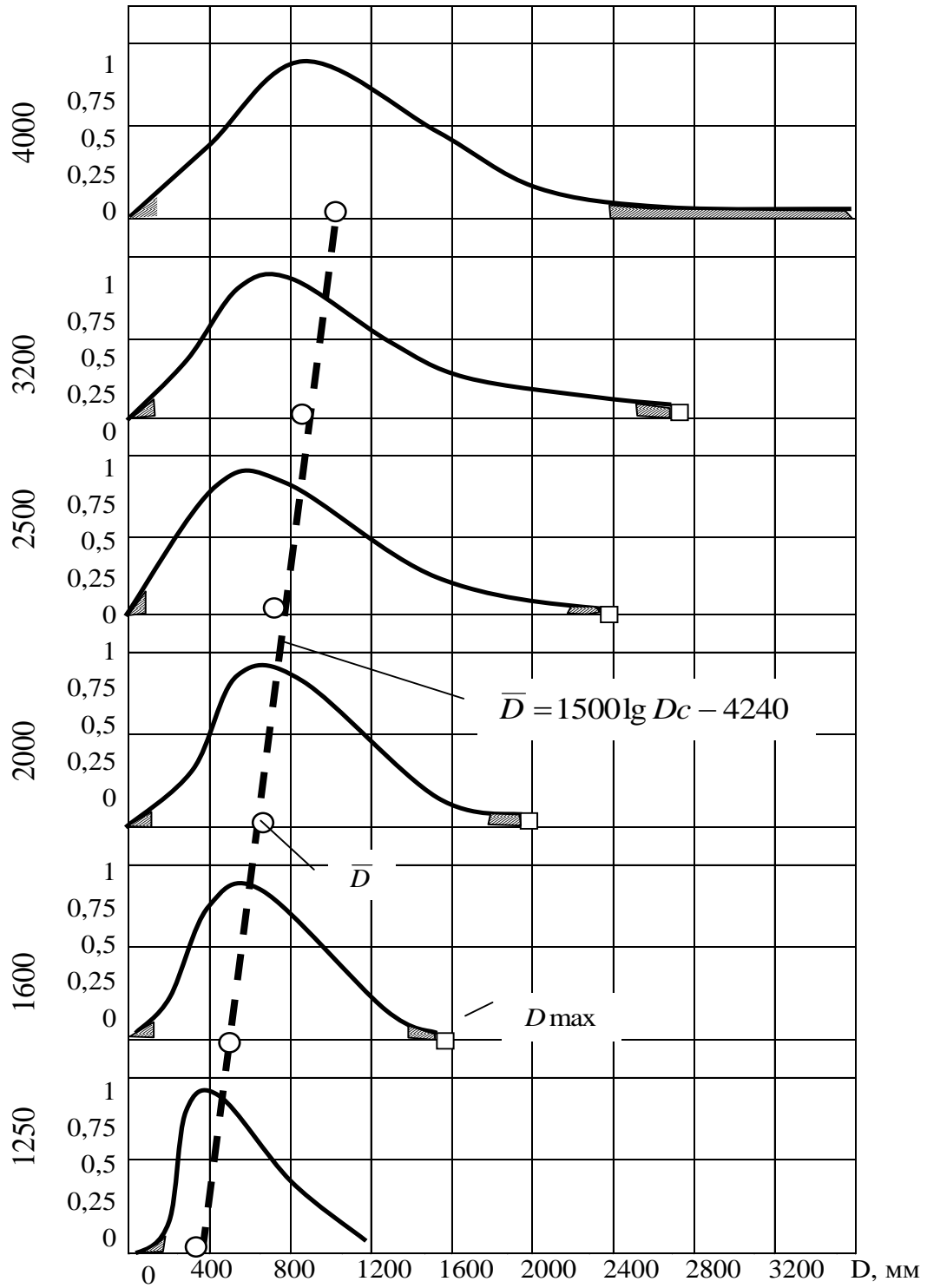


Рис.1.6. Распределение диаметров заготовок, обрабатываемых
на тяжелых токарных станках

Параметры условий обработки на тяжелых станках с $D_c \geq 1250$ мм подвержены значительному рассеиванию. Масса заготовок изменяется от 0,5 до 230 тонн (см. рис. 1.8), диаметры заготовок – от 50 до 3750 мм.

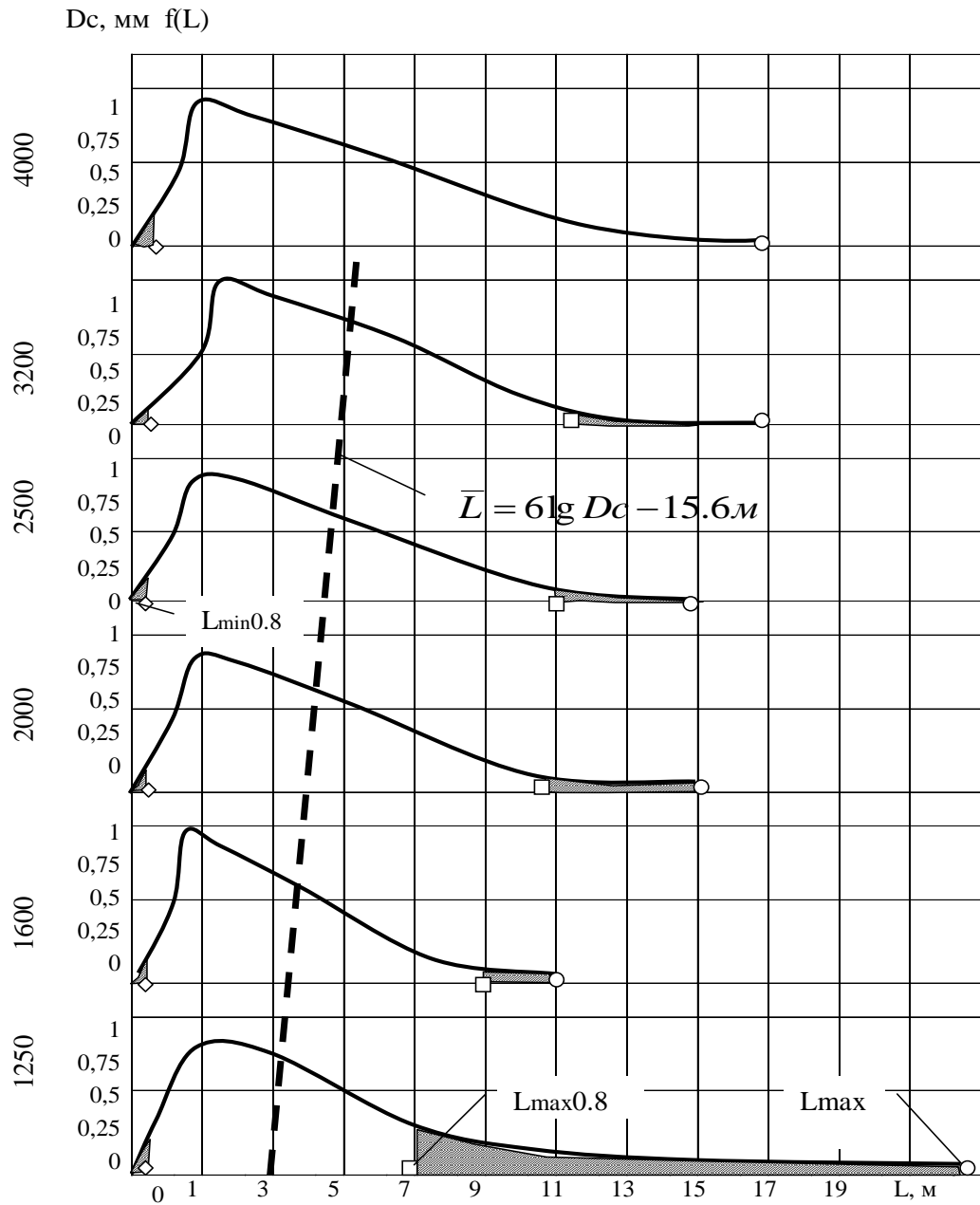


Рис.1.7. Распределение длин заготовок, обрабатываемых
на тяжелых токарных станках

Значительное рассеивание значений параметров условий обработки на станках различных типоразмеров, характеризуемое коэффициентом вариации параметра, свидетельствует о том, что не всегда параметры детали соответствуют размеру станка. Это объясняется тем, что ввиду повышенной стоимости станков на некоторых предприятиях нет необходимости иметь всю размерную гамму тяжелых станков. Иногда применение сравнительно более

тяжелого станка требуется в связи с повышенной длиной заготовки при малом диаметре или большом диаметре при малой массе (сварная трубчатая заготовка).

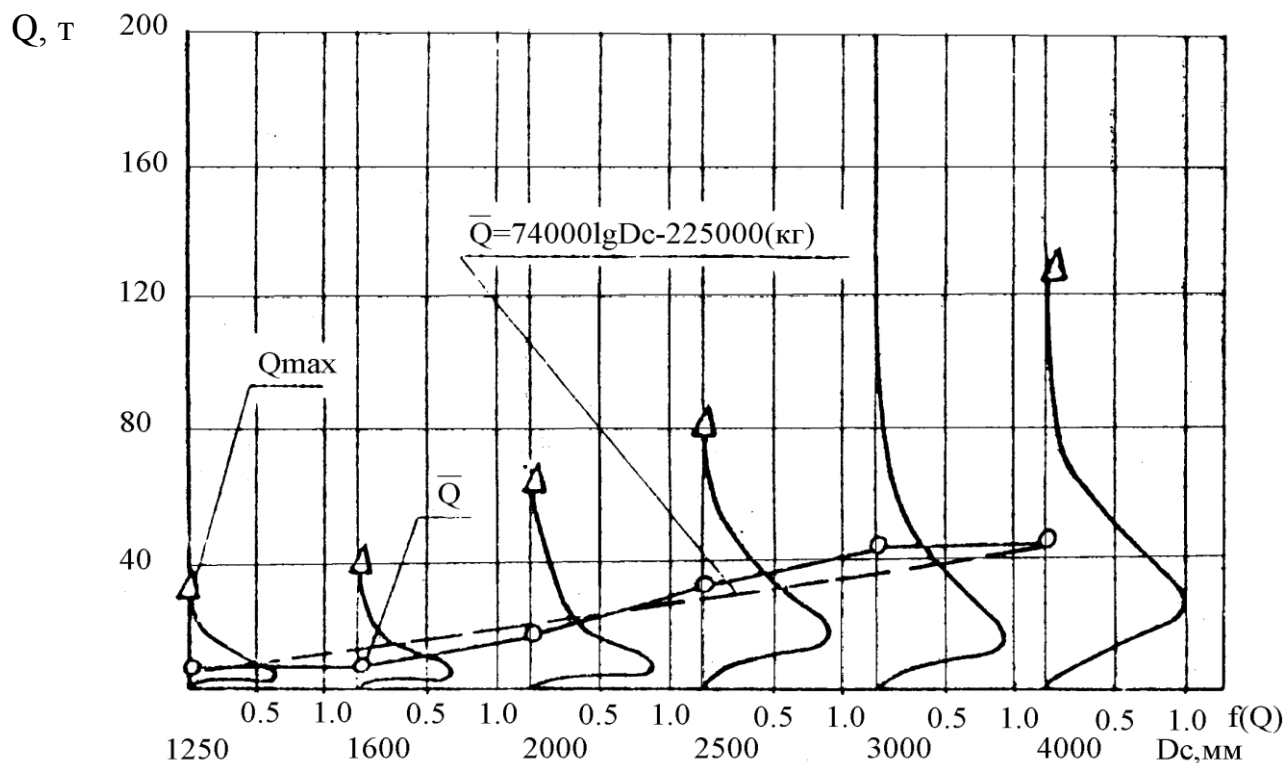


Рис. 1.8. Распределение массы заготовок, обрабатываемых на тяжелых токарных станках с различным D_c

Значения длин заготовок колеблется в очень широких пределах. Наибольшее рассеивание L наблюдается на станках с $D_c = 1250$ мм, где длины деталей достигают свыше 20 м. Это свидетельствует о том, что несмотря на большие массы заготовок, обрабатываемых на тяжелых станках, жесткость деталей иногда падает до крайне малой величины.

Номенклатура марок материалов, обрабатываемых на тяжелых станках, очень широка. Установлено, что 88% (по времени обработки) составляют заготовки из сталей, около 60% легированных преимущественно никелем, вольфрамом, ванадием и молибденом (рис. 1.9). Время обработки чугуна составляет всего 2,3%, цветных металлов и сплавов – 0,5%.

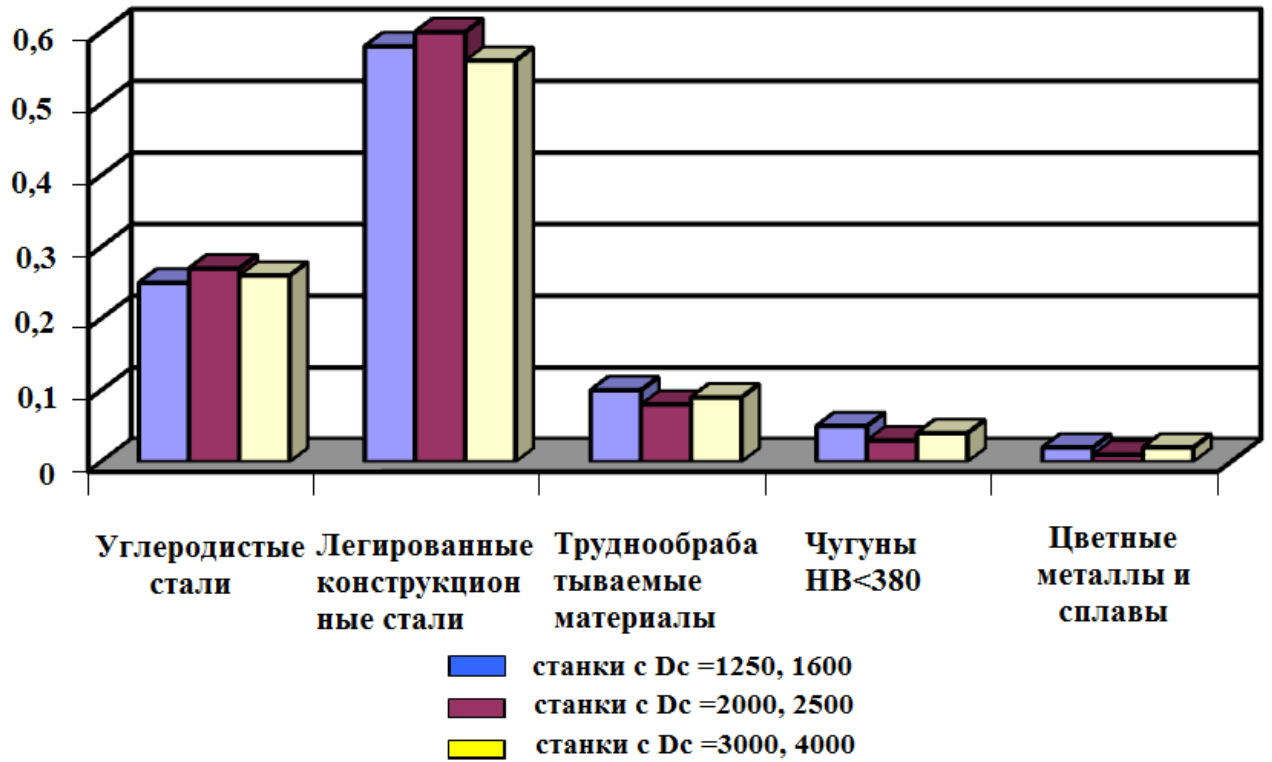


Рис. 1.9. Диаграмма распределения материала заготовок, обрабатываемых на тяжелых токарных станках

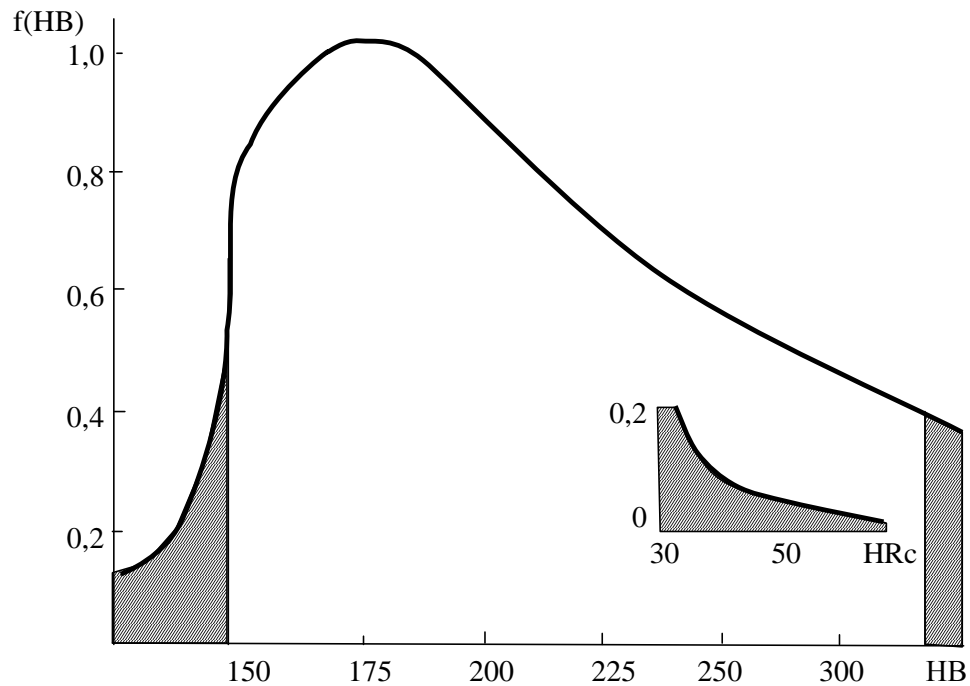


Рис.1.10. Распределение твердости обрабатываемых материалов

Для труднообрабатываемых материалов (аустенитных и закаленных сталей, отбеленного чугуна и др.) – не превышают 2%.

На рис. 1.10 представлена плотность вероятности распределения твердости заготовок, обрабатываемых на тяжелых станках. Наиболее часто обрабатывают заготовки с твердостью HB150...330. Коэффициент вариации твердости различных заготовок равен 0,48. В пределах одной детали, обрабатываемой на тяжелом токарном станке, также наблюдается значительное колебание твердости по диаметру и длине заготовки.

На тяжелых токарных станках выполняются самые различные операции (рис. 1.11). Однако, 94% составляют переходы, выполненные резцами, причем, продольное точение, в среднем 47%, а на черновых станках – 70%.

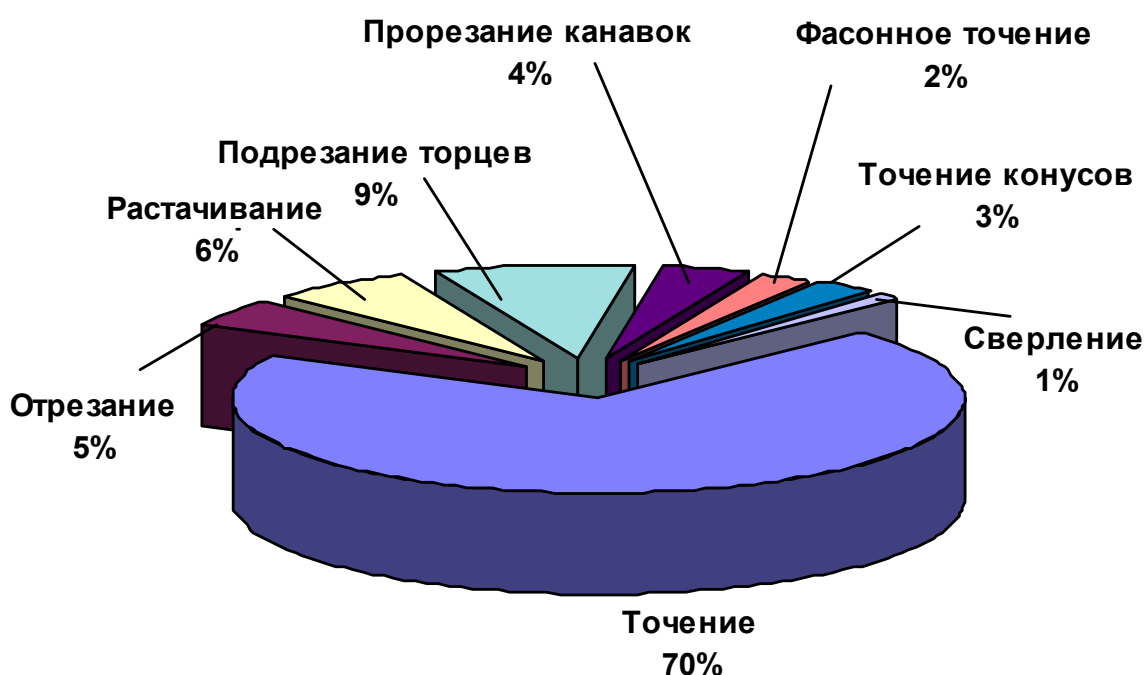


Рис. 1.11. Распределение технологических переходов на черновых тяжелых токарных станках

Данные о применении различных инструментальных материалов приведены на рис. 1.12. На тяжелых токарных станках в 89% случаев используется твердосплавный инструмент, в том числе из сплавов группы ТК и ТТК – в 86% случаев.

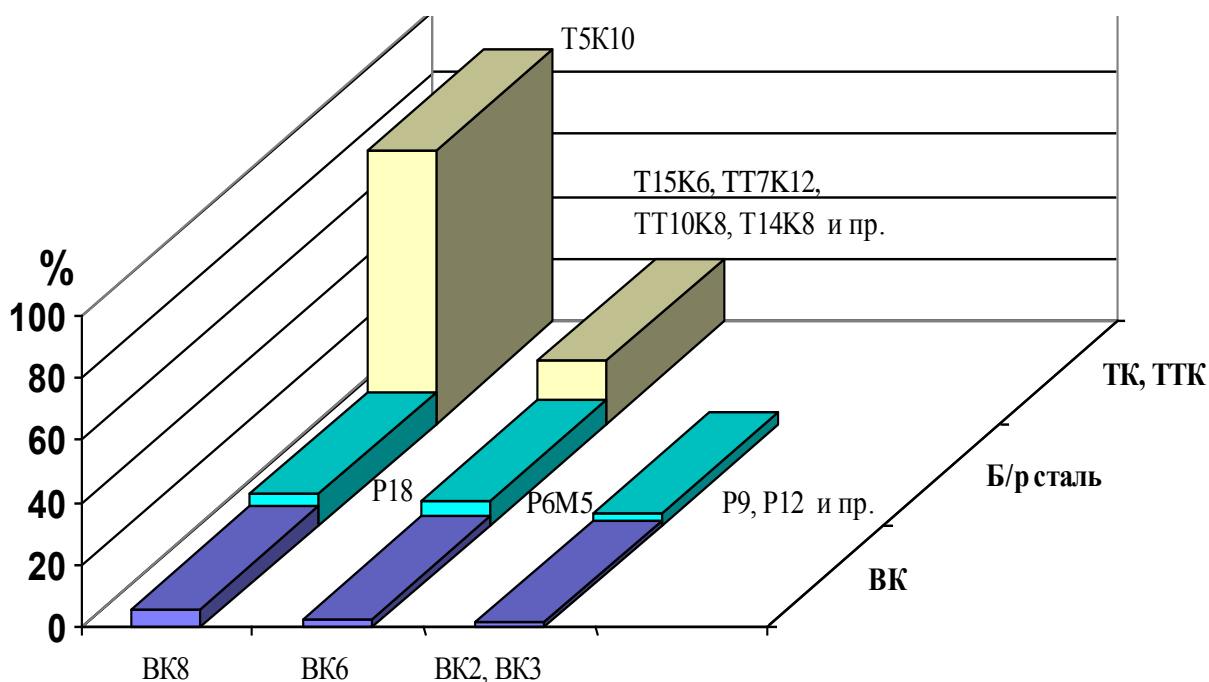


Рис.1.12. Распределение инструментальных материалов при обработке на тяжелых станках

Стохастический характер динамических процессов станков [92-93], большое рассеивание свойств обрабатываемых и инструментальных материалов [97-98, 101] и других параметров условий обработки приводит к необходимости статистических исследований параметров обработки на предприятиях тяжелого машиностроения. Появление новых инструментальных и обрабатываемых материалов, совершенствование технологических процессов требует пополнения банка данных о параметрах обработки крупногабаритных деталей.

1.2 Банк данных о прецедентах обработки деталей тяжелого машиностроения

Характеристики условий обработки на тяжелых станках получены из информационного банка данных, который был создан в ДГМА. Значительное развитие информационных технологий раскрывает новые возможности для

создания информационных банков данных на базе современной вычислительной техники. Все эти факторы приводят к необходимости усовершенствования банка данных о работе тяжелых станков, сбора дополнительных статистических данных о характере процесса резания, создания новых математических моделей, отражающих современный уровень процесса обработки на тяжелых станках.

Опыт создания банков данных накоплен в разных областях человеческой деятельности, в том числе при анализе эксплуатации инструмента некоторыми зарубежными фирмами и институтами [53].

В Англии была разработана система удовлетворения потребностей фирм в уточненных режимах обработки [126]. Ее основу составил банк, созданный путем анализа исходных данных для выбора инструмента и режимов резания, а также инструмента и режимов, применяемых на предприятиях различных фирм. Банк содержит 10000 улучшенных рекомендаций.

Во Франции ассоциация «АДЕРА» разработала банк технологических данных токарной обработки. Его основу составляет базовый банк, который должен содержать не менее 5000 режимов. Заинтересованным предприятиям выделяются мини-банки. При выборе режимов резания учитывается 71 технический параметр. Банки данных, используемые для определения параметров резания, созданы также в Германии [123], Японии [160], США [157].

Однако информация банков распространялась на область обработки только на мелких и средних станках, не всегда имела полный набор факторов, влияющих на процесс резания.

Особенности развития отечественной металлообработки в последние годы несколько изменили характер производства в тяжелом машиностроении. Поэтому информационный банк об обработке деталей на тяжелых станках нуждается в пополнении новых статистических данных и в привлечении современных математических аппаратов и аппаратных средств для обработки данных.

Особое значение при определении регламентов эксплуатации имеют исследования периода стойкости инструмента и его связей с элементами режимов резания для различных условий обработки резанием.

Наблюдение за эксплуатацией твердосплавных резцов на тяжелых токарных станках [93, 97, 98] показали, что наряду с износом, значительное место занимает разрушение режущей части, и в виде выкрашиваний и поломок.

Наличие неустраняемых отказов резцов (поломок) оказывает большое влияние на эффективность обработки крупных деталей. Поэтому нормативы режимов резания должны разрабатываться с учетом закономерностей не только износа, но и разрушения режущих инструментов.

Таким образом, возникает необходимость создания базы знаний о параметрах обработки предприятий тяжелого машиностроения, которая позволит осуществлять группировку данных по заданному признаку, определять параметры законов распределения, производить регрессионный и корреляционный анализ данных.

1.3 Анализ методов выбора определения рациональных конструктивных параметров тяжелого металлорежущего оборудования

Современные тенденции развития тяжелого машиностроения в совокупности с использованием автоматизированных станочных систем предъявляют требования к повышению производительности, точности размеров и качества обрабатываемых поверхностей деталей машин.

Исследование технологических параметров и технологических возможностей для тяжелых токарных станков имеют первостепенное значение. Эти станки имеют высокую стоимость и эксплуатируются по 25-30 лет и более. Поэтому новые станки должны не только соответствовать уровню современного производства, но и учитывать перспективу его развития.

В литературе, главным образом в иностранной [127,129,133,135,153,154,158,159,162,163,165], приводятся некоторые сведения о параметрах станков, их компоновке, технологическом оснащении и т.п. На

необходимость учета влияния компоновочного фактора указывалось в работах Аверьянова О.И., Воронова А.Л., Врагова Ю.Д., Каминской В.В., Левиной З.М., Маталина А.А., Портмана В.Т. и Решетова Д.Н., Хомякова В.С. и Давыдова И.И., Сино Х. и Ито И., Шпура Г., Исхакова З.Ф. и др. [11,27,29,49,70,88,96,136].

Врагов Ю.Д. впервые выделил компоновку станка как самостоятельный объект исследования. Разработанные им основы компоновки станка послужили основой для последующих работ в данной области, которые в своем развитии прошли путь от анализа компоновок к синтезу [3].

Давыдов И.И. предлагал на этапе анализа компоновок искусственно синтезировать силовое соотношение, заменяющее усилие резания и наиболее полно раскрывающее свойства компоновки многооперационного станка при различных видах обработки [78]. Но единственность соотношения предлагаемого силового фактора резко сужала область его использования и не позволяла перенести его на всю гамму станков и на перспективные разработки. Этап синтеза представляет специфические требования к систематизации силового фактора. В данном случае в силовом воздействии необходимо выделить такие признаки, которые позволили бы использовать общие условия работы со станками всех типов и влиять на качество станка уже на этапе синтеза.

Предложенная ранее Враговым Ю.Д. система предварительного формирования множества компоновок методом выбора по обобщенным структурным формулам нашла свое отражение в работах Аверьянова О.И. и Гельштейна Я.М. при пространственном синтезе компоновок из готовых блоков-модулей [26]. Введение ограничений на распределение координатных перемещений и положения основания в структуре компоновки позволило уменьшить число компоновок, но окончательный выбор компоновок все равно производился после вычисления критериев геометрической точности и податливости. Хотя Враговым Ю.Д. уже был сформулирован ряд условий отбора, способствующих выделению перспективных компоновок [3].

В работах Давыдова И. И. и Лехмуса М. Ю. указывалось на возможность использования при синтезе компоновок экспертных систем и экспертных знаний. Это позволило бы еще на этапе синтеза производить направленный отбор компоновок с различными потенциально высокими показателями качества [78]. Разработанная Каминской В. В., Панышевым Н. Н., Гринглазом А. В. , Колупаевым А. А. экспертная система для выбора компоновок нуждается в своем смысловом наполнении, определению для каждой новой компоновки своего потенциала качества по выбранному критерию [95, 50].

При составлении технического задания на новую гамму станков необходимо изучить фактическое использование действующих станков на разных заводах и проанализировать требования к технологическим возможностям и техническим параметрам, предъявленным к тяжелым токарным станкам различными отраслями производства. Также необходимо выявить слабые конструктивные элементы, сложность разборки и регулировки узлов тяжелых токарных станков.

В настоящее время известно достаточно много работ, посвященных разработке методов по выбору существующего и проектированию нового металлорежущего оборудования.

Среди отечественных ученых следует отметить работы сотрудников кафедры конструирования станков и машин НТУУ «КПИ» под руководством Струтинского В.Б. Основными направлениями его работ является разработка и исследование высокотехнологичного оборудования, разработка научных основ теории проектирования оборудования и определения его статических и динамических характеристик [105-109, 37]. В работах Кузнецова Ю.Н. предложена концепцию создания станков нового поколения, в том числе с параллельной кинематикой, которая предусматривает генетико-морфологический подход к эволюции и синтеза сложных механических и электромеханических систем, а также модульный принцип их проектирования и изготовления [71-72].

Значительный вклад в данную область исследований внесли ученые: Аверьянов О.И., Базров Б.М., Белянин П.Н., Васильев В.Н., Врагов Ю.Д., Голубева М.В., Ковалёв В.Д., Бабин О.Ф., Дашенко А.И., Демьянюк Ф.С., Дружинский И.А., Кудинов А.В., Кузнецов Ю.Н., Лескин А.А., Лещинский Л.Ю., Логашев В.Г., Луцев И.В., Маталин А.А., Митрофанов С.П., Ныс Д.А., Соломенцев Ю.М., Струтинский В.Б., Пуш В.Э., Трушин Н.Н., Черпаков Б.И., Чуликов Е.И., Шарин Ю.С., Шрайбман СМ., Федотов А.И. и другие.

Все работы по критериям выбора оборудования можно условно разделить на три основные группы:

- 1) выбор группы оборудования из большого их числа по основным параметрам: тип, мощность, размеры рабочего пространства, класс точности;
- 2) выбор моделей станков на основании технико-экономических расчетов;
- 3) выбор оборудования на основании характеристик подлежащих обработке заготовок деталей.

В работах предлагаются автоматизированные системы, позволяющие пользователю выбрать почти из 5000 наименований станков наиболее рациональный вариант по ключевым параметрам: тип, степень автоматизации, гибкость переналадки, мощность, стоимость и др. Информация представлена в виде таблиц, доступ к которым пользователь получает в диалоговом режиме с персональной ЭВМ.

Очевидно, что первая группа методов носит субъективный характер и ориентирована на высокопрофессионального пользователя.

Вторая группа методов предусматривает выполнение технико-экономических расчетов при выборе существующего или проектировании нового оборудования.

Например, сравниваются два основных варианта реализации технологических процессов в серийном производстве:

- обработка на универсальном оборудовании с ручным управлением;

— обработка на многооперационном станке с ЧПУ.

Для сравнения вариантов рассчитываются приведенные затраты $Z_{пр}$ на изготовление одной детали:

$$Z_{пр} = \sum A \cdot T_{шк} + C_{пр}/n, \quad (1.2)$$

где A – стоимость станко-часа, грн./ч; $T_{шк}$ – штучно-калькуляционное время обработки детали на станке, ч; $C_{пр}$ – стоимость установочных приспособлений, грн.; n – количество обрабатываемых деталей в год, шт.

Затем определяется количество деталей n , при котором эффективно применение станка с ЧПУ:

$$n < \frac{\sum AT_{пз} - (C_0 + C_{ни}) + (C_{пр} + C_{прм})}{A_M T_{мтшт} - \sum AT_{шт}}, \quad (1.3)$$

где $T_{га}$ – подготовительно-заключительное время; C_0 – однократные затраты для подготовки к обработке заготовок на станке с ЧПУ; $C_{пг}$ – повторяющиеся для каждой партии затраты на станок с ЧПУ; $C_{пр}$ – стоимость установочного приспособления на станке с ЧПУ; A_M – стоимость станко-часа станка с ЧПУ;

Представленный метод чисто экономической оценки эффективности применения станка с ЧПУ по сравнению с универсальными станками с ручным управлением совершенно не рассматривает технологическую насыщенность станка с ЧПУ. Отсюда стоимость станко-часа, а, следовательно, и себестоимость обработки станка с ЧПУ могут быть существенно завышены и, тем самым, смещена область эффективного использования станка с ЧПУ.

Оценка уровня технологической насыщенности должна предшествовать экономическим расчетам. Кроме того, одновременно можно сравнивать только два варианта оборудования при достаточно полной разработке техно-

логических процессов по обоим вариантам, что приводит к существенному увеличению трудоемкости и сроков технологической подготовки производства.

Третья группа методов, как правило, не требует при сравнении вариантов разработки технологических процессов, а основывается на оценке характеристик деталей, например показателя «сложности детали».

Интересен метод оценки взаимосвязи между сложностью детали, технологическими возможностями станков с ЧПУ и их стоимостью, основанный на использовании классификационных рядов. Технологические возможности ряда токарных станков в основном ранжированы по инструментальному оснащению, увеличение которого приводит к повышению стоимости станков. Наиболее дорогая модель станка с ЧПУ, которой заканчивается классификационный ряд, имеет магазин инструментов, дающий большие возможности для обработки сложных деталей. Затем осуществляется классификация деталей по признакам технологических возможностей станков, т.е. детали фактически ранжируются по сложности их обработки.

Данный метод обеспечивает выбор станков из ранжированного по стоимости ряда от самых дешевых с переходом к более дорогим только при наличии повышенных значений технологических характеристик обрабатываемых заготовок. Однако, оценки технологической насыщенности станков с ЧПУ только по количеству применяемого инструмента явно недостаточно, отсутствует система классификации деталей, что на практике существенно затрудняет формирование ряда деталей. Кроме того, сам ряд деталей представляется необоснованным, так как, например, отсутствуют детали с коническими, криволинейными, комбинированными поверхностями, что на практике не бывает и совершенно не рассматривается технология обработки каждой детали ряда.

Каждая деталь оценивается сложностью C_{cm} в зависимости от ряда конструктивных и технологических характеристик.

Получено регрессионное уравнение между трудоемкостью обработки на станке с ЧПУ T_{um} и сложностью детали C_{cm} :

$$T_{шт} = 9 + 126C_{ст}, \quad (1.4)$$

По мнению авторов, линия регрессии служит границей области эффективного оборудования с ПУ или РУ.

Однако, неясно как при определенной сложности $C_{ст}$ выбрать наиболее эффективный вариант оборудования, так как параметр C не связан с параметрами станков. Кроме того, выбор станка технологом под конкретную деталь не дает гарантии, что станок в целом будет эффективно эксплуатироваться в производстве. Определение конструктивной сложности C_k по количеству поверхностей детали достаточно трудоемко.

Более обобщающим представляется подход к созданию нового оборудования, предложенный профессором Базровым Б.М. в рамках модульной технологии изготовления деталей [6-7]. В качестве объекта классификации деталей принято сочетание поверхностей, называемое модулем поверхностей (МП). Затем на основе анализа МП разрабатываются модульные технологические процессы, которые представляют собой последовательность операций обработки тех или иных МП. На следующем этапе формулируются требования к созданию перспективного типажа металлорежущего оборудования для реализации модульной технологии. К недостаткам данного метода следует отнести достаточно сложную систему классификации деталей, требующую высокой квалификации технологов для определения видов МП; область применения метода преимущественно крупносерийное производство. Кроме того, в работе нет системного подхода к формированию технологической насыщенности перспективного оборудования и методик выбора существующего оборудования с ЧПУ.

Логичным представляется функционально - структурный подход к построению перспективных токарных многоцелевых станков. В работе выявлены наиболее распространенные группы деталей и разработаны комплексные детали - представители. На основе исследования характеристик комплексных деталей сформированы функциональные модели токарных

многоцелевых станков, где в качестве основных функций приняты формообразующие координатные перемещения исполнительных органов станка, а вспомогательные функции определяют перемещения исполнительных органов станка относительно друг друга и заготовки для реализации формообразующих координат. Определение функций оборудования позволило определить рациональную технологическую насыщенность станков для изготовления определенных групп деталей.

Большой объем разработок выполнен по групповой технологии изготовления деталей, позволившей повысить специализацию серийного производства. В рамках групповой технологии предложены различные методы классификации и группирования деталей для формирования предметно - специализированных производственных участков. При этом, предлагается модернизировать существующий типаж металлорежущего оборудования с целью повышения его специализации и, соответственно производительности обработки. Вместе с тем, в известных работах не выявлена взаимосвязь между характеристиками деталей и параметрами оборудования и не сформированы требования к созданию нового металлорежущего оборудования (в том числе с программным управлением), специализированного на изготовлении определенных групп деталей.

Таким образом, анализ работ показал, что к настоящему времени выполнены серьезные наработки в области выбора существующего и проектирования нового металлорежущего оборудования. Однако, отсутствует системный подход, позволяющий на основе исследования взаимосвязи характеристик подлежащих обработке деталей, параметров технологических процессов их изготовления и технологической насыщенности оборудования, осуществлять потребителями выбор наиболее эффективного тяжелого станка с ЧПУ для своих производственных условий, в том числе разработку технологических структур нового оборудования.

В настоящее время производители металлорежущего оборудования не имеют четкой картины о требованиях потребителей к характеристикам станков,

а потребители испытывают трудности с выбором рационального металлорежущего оборудования для своих производственных условий.

Недостаточность информации на этапе проектирования станочного оборудования и научно обоснованных рекомендаций, направленных на решение проблемы сбалансированности характеристик станков и потребностей предприятий приводит к неэкономному расходованию материальных и энергетических ресурсов.

Производители станков, стремясь к максимальной прибыли, рекламируют возможности выпускаемого оборудования по точности и производительности, используя их максимальные показатели, достигаемые в отдельных областях рабочего пространства с наиболее удачными соотношениями характеристик заготовок и режущего инструмента, в то время как потребителя интересует оборудование, обеспечивающее решение всего спектра технологических задач, стоящих перед предприятием. Поэтому вопросы проектирования нового оборудования на базе статистических исследований предприятий тяжелого машиностроения требуют системного исследования.

1.4 Анализ методов определения рациональных параметров процесса резания на тяжелых станках

Отдельными проблемами определения рациональных параметров процесса резания занимались исследователи, внесшие большой вклад в развитие теории резания материалов, проектирования режущих инструментов, формообразования технологических систем. К ним относятся: Адам Я.И., Бобров В.Ф., Верещака А.С., Внуков Ю.Н., Гавриш А.П., Грабченко А.И., Грановский Г.И., Дрожжин В.И., Зиновьев Н.И., Зорев Н.Н., Кабалдин Ю.Г., Карпусь В.Е., Карюк Г.Г., Клименко Г.П., Клименко С.А., Ковалев В.Д., Клушин М.И., Кузнецов Ю.Н., Лоладзе Т.Н., Макаров В.Д., Мироненко Е.В., Новиков Н.В., Новоселов Ю.К., Остафьев В.А., Перепелица Б.А., Подураев В.М., Равская Н.С., Родин П.Р., Розенберг О.А., Старков В.К.,

Струтинский В.Б., Темчин Г.И., Тимофеев Ю.В., Узунян М.Д., Хае Г.Л., Этин А.О., Якубов Ф.Я. и др.

Работы по созданию системы процесса резания проводили Залого В.А., Клушин М.И., Остафьев В.К., Подураев В.М., Равская Н.С., Старков В.К., и др. [45, 57, 84-86, 94, 102-104]. Исследователями установлены некоторые взаимосвязи между входными параметрами процесса резания, параметрами технологической системы и выходными параметрами, представляющими собой целевые функции для оптимизации процесса механической обработки, сконструированы системы различных конфигураций, в том числе и учитывающие физическую сущность процессов. На стохастический характер процесса резания указывали авторы работ [4, 22-25, 28,32-34.48, 55,61, 73, 74,79.99,110,113,119,120,132,137,164]. В этой связи система механической обработки, предложенная Старковым В.К. [102] рассматривает процесс резания как сложный физико–химический механизм взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом в условиях рассеяния свойств всех составляющих элементов технологической системы. Параметры, которые определяют протекание процесса резания, подразделяются на входные, функциональные и выходные. Входные параметры подразделяют на определяющие, управляемые и возмущающие. К определяющим, или обязательным, параметрам относят марку обрабатываемого материала, выбранный метод механической обработки, требования к точности и качеству обработки и другие параметры. Управляемые параметры включают в себя параметры, которые выбираются при проектировании техпроцесса или изменяются в ходе обработки деталей. Например, марка инструментального материала, конструкция и геометрия режущего инструмента, модель станка, режим обработки, состав, способ и интенсивность подачи технологической среды и т.д. Среди возмущающих параметров процесса резания выделяют систематические и случайные параметры. К числу систематических возмущающих параметров относят закономерное изменение режимов резания, геометрии инструмента, которые вызваны конструктивными особенностями обрабатываемых деталей и

кинематикой резания. К случайным возмущающим параметрам резания относят неконтролируемые изменения свойств заготовки и инструмента, припуска, статические и динамические характеристики оборудования и технологической системы и др. Функциональные параметры количественно характеризуют физико–химический механизм собственно процесса резания, определяя его протекание во времени. Внешним проявлением функционального состояния технологической системы резания является сила резания и ее составляющие, температура в зоне обработки, акустическая эмиссия, характер и интенсивность изнашивания инструмента и др. К числу выходных параметров процесса резания относятся производительность и точность обработки, свойства поверхностного слоя детали, экономические показатели, надежность и т. д. В системе механической обработки, представленной таким образом, учитывается только часть процесса эксплуатации режущего инструмента, определяющая непосредственную обработку соответствующего изделия на станке. Однако при использовании режущего инструмента возникает комплекс вопросов технико-экономических, организационных, информационных, технологических и др., которые не рассматриваются в структурных схемах механической обработки, но вместе с тем являются определяющими при ее функционировании. В связи с этим для повышения эффективности технологической системы механической обработки необходимо рассмотреть круг вопросов, которые должны быть охвачены с позиций системного подхода при рассмотрении процесса обработки на тяжелых станках.

Развитие и совершенствование прогрессивных приемов металлообработки в современном машиностроении связано с применением автоматизированных станочных комплексов, основу которых составляют станки с числовым программным управлением. Для применяемых при точении станков характерна чрезвычайно высокая степень автоматизации и высокая стоимость станко-часа их работы.

При этом выбранные режимы резания, определяющие машинное (основное) время обработки оказывают значительное влияние на переменную

величину себестоимости обработки и уровень производительности процесса резания.

Однако, несмотря на высокое техническое оснащение, вопросы назначения и оптимизации режимов резания для станков с ЧПУ до сих пор решаются вне рабочего места. В последнее время для этих целей используется опыт подготовки технологической информации на ЭВМ.

Каждое новое поколение отечественных и зарубежных металлообрабатывающих станков и систем ЧПУ отличается более высоким уровнем автоматизации, но ни одно из них пока не имеет программного обеспечения и технических средств, способствующих надежному выбору оптимального режима резания. Так, при высокой степени автоматизации в подготовке геометрической информации в современных отечественных системах ЧПУ, технологическая информация, касающаяся выбора режимов обработки, в большинстве случаев готовится "вручную". Для этого используются методики расчета элементов режима резания, разработанные применительно к универсальным станкам.

По мере увеличения степени автоматизации станков с ЧПУ идет перераспределение баланса времени между основным (машинным) и подготовительно-заключительным, вспомогательным временем и временем организационно-технического обслуживания. Если для универсальных станков основное время составляет 25-30%, то для станков с ЧПУ 48-50% [72] и в перспективе для этого вида оборудования оно может быть доведено до 90% [68] от времени, затрачиваемого на операцию. Необходимость повышения производительности автоматизированного станочного оборудования за счет сокращения машинного (основного) времени диктует необходимость выполнения операций расчета оптимальных режимов обработки непосредственно системой ЧПУ.

Машинное время, как известно, определяется скоростью резания, величиной подачи и глубиной резания. Глубина резания назначается в зависимости от качества детали и качества заготовки, т. е. определяется

припуском на обработку и количеством переходов. Поэтому, при подготовке УП для станков с ЧПУ стоит задача с учетом технических требований к детали, при известной глубине резания, известных обрабатываемом и инструментальном материалах выбрать оптимальные значения величины допустимой подачи, обеспечивающей заданную точность и значение скорости резания, обеспечивающее заданную стойкость инструмента. При этом выборе подачи предшествует операция расчета составляющих силы резания.

Под оптимальными параметрами режима резания понимаются такие значения величины скорости резания и подачи, при которых процесс обработки был бы максимально эффективен с точки зрения экономичности и производительности, и при этом выполнялись бы все технологические требования, предъявляемые к обрабатываемой детали. На необходимость автоматизированного расчета оптимальных значений параметров режима резания указывалось еще в середине прошлого века [30, 33, 46, 76-77, 81, 112, 119 121, 138], но полностью эта задача до сих пор не решена и актуальность ее продолжает повышаться с развитием тенденции многостаночного обслуживания и созданием автоматизированных станочных комплексов для обработки металлов резанием.

На данный момент существуют математические модели и методы оптимизации технологических операций на различных уровнях: от самого высокого (производственного), до низшего (физического) [44, 48, 73, 83-85, 128, 155-156, 166, 167]. На производственном уровне объектом рассмотрения является технологический процесс изготовления детали, а целями оптимизации являются структура технологической операции и ее параметры. На промежуточном технологическом уровне объектом является технологическая система рабочего места, и решаются задачи технико-экономического и качественного характера.

На физическом уровне рассмотрения объектом является система «инструмент-заготовка» с учетом активности внешней среды. Именно на этом уровне решается задача определения области значений параметров режима

резания, и именно он является основой для более высоких ступеней оптимизации технологического процесса.

При всем многообразии математических моделей и методов, решение задачи оптимизации на физическом уровне, то есть оптимизации режимов отдельной токарной операции, во многом остается задачей чисто теоретической. Практика современного машиностроения показывает, что применение методов оптимизации крайне ограничено и всегда выполняется вне рабочего места, без учета реальных условий в зоне резания, с использованием априорной информации о свойствах обрабатываемых и инструментальных материалов.

В настоящее время определение оптимальных режимов резания осуществляется по математическим моделям с использованием ряда поправочных коэффициентов, учитывающих переменные факторы процесса обработки (свойства инструментального и обрабатываемого материалов, геометрию инструмента, наличие охлаждения и др.). Следует отметить, что существующие методы расчета оптимальных величин элементов процесса резания учитывают переменные факторы процесса резания с помощью усредненных поправочных коэффициентов, следствием чего является значительный разброс расчетной и действительной стойкости инструмента, определяющей надежность его работы, а также разброс составляющих силы резания, призванной обеспечивать точность обработки. Это, в свою очередь, является следствием допускаемого ТУ разброса свойств инструментального и обрабатываемого материалов и несовершенством методик расчета.

При определении режима резания по существующим математическим моделям не удастся установить связь между основными переменными факторами, влияющими на процесс резания (вибрация, неоднородность инструментального и обрабатываемого материалов, наличие или отсутствие охлаждения и т.д.). Режимы резания, выбираемые по существующим математическим моделям, в этом случае могут быть оптимальными лишь для условий, в которых они были получены [9], и только для тех конкретных резцов

и стальных заготовок из партий поставок, которые участвовали в предварительных испытаниях.

В работе [138] подчеркивается, что «используемые в настоящее время справочные данные для выбора скорости резания, подачи и глубины резания, взятые из различных источников для идентичных условий резания, сильно отличаются друг от друга и не позволяют обоснованно назначать способ обработки».

Попытки уточнить эмпирические зависимости «скорость резания - стойкость инструмента» путем применения более сложных математических выражений, учитывающих большее количество факторов, не разрешили проблему выбора оптимальных режимов резания расчетным путем [10],

В ряде случаев идут на значительное (до 60-70%) снижение уровня режимов резания относительно нормативных [80] в предположении, что более низкие режимы резания обеспечат более стабильную работу инструмента и, в итоге, повысят общую производительность обработки. При этом, при заданном периоде стойкости инструмента, выявляется значительный статистический разброс значений стойкости – до 200%. Следствием снижения интенсивности обработки является еще большее увеличение статистического разброса значений стойкости инструмента, недоиспользование инструмента и оборудования, что в совокупности отрицательно сказывается на технико-экономической эффективности автоматизированного оборудования. Очевидно, что при таком подходе применение методик оптимизации режимов резания нецелесообразно.

Поколение вновь создаваемых систем ЧПУ отечественного и зарубежного производства ориентировано на диалоговую автоматизированную подготовку управляющих программ непосредственно на рабочем месте [103, 130, 139-142]. В диалоговых системах ЧПУ предпринята попытка автоматизировать процесс выбора режимов резания. Так в устройстве ЧПУ для токарной обработки фирмы «Фанук» содержится алгоритм расчета режимов резания, с результатами которого оператор либо соглашается, либо предлагает

свои варианты. То есть окончательное решение о величине скорости резания и подачи (при бесспорном варианте выбора глубины резания – она определяется величиной припуска) принимает оператор на основе своего опыта.

В алгоритме автоматизированного расчета режимов резания в этом случае также заложены эмпирические зависимости, которые, как указано в работах [41,44] страдают серьезным недостатком - низкой надежностью определения заданных параметров, в результате чего возможность решения задачи выбора оптимальных режимов обработки становится маловероятной.

Если оператор управляет работой одного станка с ЧПУ, у него имеется возможность корректировать рассчитанные режимы резания на основе визуального наблюдения, используя личный опыт работы, обеспечивая тем самым приемлемые величины стойкости инструмента, производительности, точности и качества обработки. При многостаночном обслуживании или при работе станков в составе ГПС физической возможности одновременного контроля за ходом процесса обработки на нескольких станках у него нет. Следует также отметить, что опыт и интуиция оператора не поддаются алгоритмизации, а принятые решения носят субъективный характер. Такой подход приводит к сдерживанию дальнейшего развития автоматизации процесса выбора оптимальных условий лезвийной обработки.

Таким образом, на данный момент в практике машиностроения сложилась противоречивая ситуация. С одной стороны, существующие системы ЧПУ, созданные на микропроцессорной архитектуре, способны выполнять сколь угодно сложные вычисления и вести расчет оптимальных режимов обработки непосредственно на рабочем месте в ходе технологического процесса. С другой стороны, основные расчетные зависимости, которые традиционно кладутся в основу алгоритмов расчета оптимальных режимов резания, страдают значительными неточностями, что делает нецелесообразным применение алгоритмов расчета и оптимизации режимов обработки.

Одним из путей решения проблемы является отказ от построения математических моделей оптимизации на основе усредненных математических зависимостей, экстраполируемых на весь диапазон используемых скоростей резания и на марочный состав применяемых инструментальных и обрабатываемых материалов, и введение оперативного контроля индивидуальных свойства каждой пары инструмент-деталь. Концепция индивидуальной оценки свойств инструмента и стальной заготовки изложена в работе В. К. Старкова [102], однако практические рекомендации для ее воплощения отсутствуют.

Очевидно, что расчет и оптимизация режимов обработки в автоматическом режиме целесообразны, только если в их основу положены физически обоснованные математические зависимости, учитывающие условия, возникающие в зоне резания для каждой конкретной операции резания.

Вопросы выявления значимых параметров и разработки математических моделей для реализации системы адаптивного оптимального управления процессом механической обработки на тяжелых станках требуют проработки.

В настоящее время для нормирования работ на средних токарных станках наибольшее применение находят нормативы.

Большинство действующих нормативов рассчитаны на применение универсального оборудования и не имеют рекомендаций по режимам резания для станков с ЧПУ.

При разработке общемашиностроительных нормативов режимов резания было заложено значение стойкости инструмента, соответствующее практическому опыту предприятий. В последующих нормативах значения стойкости инструмента также не были теоретически обоснованы. В нормативах отсутствуют также возможные диапазоны рассеивания стойкости.

В настоящее время накоплено большое количество теоретических и экспериментальных данных для расчёта скорости резания, но по выбору подач, особенно при черновом точении, таких данных очень мало.

Рекомендуемые подачи в нормативах обычно даются в зависимости от глубины резания.

Исследованиями [111, 41] показано, что твёрдосплавный и некоторые типы быстрорежущего инструмента выдерживают в 2–6 раз меньшее число периодов стойкости K , чем предусмотрено нормативами. Расхождение между фактическим и нормативным значениями принято объяснять плохой эксплуатацией инструмента. Такое объяснение верно лишь отчасти, так как соблюдение правил эксплуатации может увеличить число периодов стойкости K не более, чем в 1,5 раза. Число переточек рассматриваемого инструмента определяется его прочностью и нагрузкой на инструмент, а не допустимой величиной стачивания.

Действующие нормы расхода инструмента не учитывали уровня режимов резания и давались в отрыве от нормативов.

В действующих нормативах режимов резания и норм расхода инструмента не учтено влияние на выбор элементов режима резания типоразмера станка, конструкции инструмента и его надежности, возможностей рабочего.

В связи с тем, что разработке нормативов не предшествовал детальный статистический анализ условий обработки на тяжелых токарных станках, нормативные таблицы в некоторых случаях имеют диапазоны входных и выбираемых параметров, не соответствующие производственным условиям.

При выборе режимов резания для одной операции по действующим нормативам необходимо обращаться к большому числу таблиц, что вызывает большие потери времени. Поэтому задачи создания нормативов режимов резания для станков с ЧПУ требуют подробной проработки.

1.5 Системы адаптивного управления процессом резания на тяжелых станках

Тяжелые станки нового поколения имеют все технические возможности для регулирования параметров обработки непосредственно во время обработки

в режиме реального времени. Современные системы ЧПУ позволяют использовать пре - и постпроцессоры, а также информацию от измерительных устройств, которые фиксируют параметры процесса обработки (температуру, усилия, крутящие моменты, вибрации и др.). С помощью этих средств в процессе обработки динамически корректируется начальная программа ЧПУ с режимными параметрами и геометрией инструмента [1, 2, 35].

Кроме этого, есть возможность осуществления управления с системой самообучения, с переменной структурой управления, многомерными обратными связями. Для осуществления управляющего воздействия используются и разрабатываются новые мехатронные системы.

Основой любого процесса управления является информация о состоянии объекта и возмущающие воздействия на него, которые используются в системе для получения управления, изменяющие режим работы объекта с целью обеспечения лучшей работы замкнутой системы [40, 61, 100, 102].

Адаптивное управление – совокупность методов теории управления, позволяющих синтезировать системы управления, которые имеют возможность изменять параметры регулятора или структуру регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних возмущений, действующих на объект управления.

Адаптивная система – система, автоматически изменяющая данные алгоритма своего функционирования и (иногда) свою структуру с целью сохранения или достижения оптимального состояния при изменении внешних условий.

По характеру изменений в управляющем устройстве адаптивные системы делят на:

- самонастраивающиеся (изменяются только значения параметров регулятора);
- самоорганизующиеся (изменяется структура самого регулятора).

По способу изучения объекта системы делятся на:

- беспоисковые;

— поисковые, из которых наиболее известны экстремальные системы, целью управления которых является поддержание системы в точке экстремума статических характеристик объекта. В таких системах для определения управляющих воздействий, обеспечивающих движение к экстремуму, к управляющему сигналу добавляется поисковый сигнал;

— системы с эталонной моделью – ЭМ (содержат динамическую модель системы, обладающую требуемым качеством);

— системы с идентификатором (настраиваемой моделью) – ИМ.

— с прямым способом управления (благодаря учёту взаимосвязи параметров объекта и регулятора производится непосредственная оценка и подстройка параметров регулятора, чем исключается этап идентификации параметров объекта);

— с косвенным способом управления (сначала делается оценка параметров объекта, после чего на основании полученных оценок определяются требуемые значения параметров регулятора и производится их подстройка).

По способу достижения эффекта самонастройки системы с моделью делятся на:

— системы с сигнальной (пассивной) адаптацией (эффект самонастройки достигается без изменения параметров управляющего устройства с помощью компенсирующих сигналов);

— системы с параметрической (активной) адаптацией;

— комбинированные системы (сочетают в себе оба вида адаптации).

Программируемый логический контроллер (контроллер электроавтоматики, ПЛК) – это устройства, осуществляющие преобразование, обработку, хранение информации и выработку команд управления или управляющих/регулирующих воздействий, реализованные на базе микропроцессорной техники и являющиеся, специализированными управляющими вычислительными комплексами для работы в локальных и распределенных системах управления в режиме реального времени.

Основная функция ПЛК в составе системы ЧПУ – это управление всеми агрегатами и механизмами станка не относящимися к приводам подачи и процессу формообразования, а также циклом работы станка в целом. Повышение вычислительной мощности, расширение набора команд с введением математических операций, открытость программирования, появление аналоговых входов для различных датчиков позволяет реализовывать на его основе помимо основных функций различные дополнительные задачи адаптивного управления процессом обработки.

Теоретические предпосылки адаптивного управления работой станков появились в работах таких авторов, как А. М. Ляпунов, Г. Найквист, Е. П. Попов, А. В. Михайлов. Обобщение информации в этом направлении отражено в работах Б.С. Балакшина [8]. Однако реализация адаптивного управления процессом обработки почти не получила практического применения в силу недостаточного технического уровня электронных средства измерения, управления и автоматизации и, как следствие, сложности и низкой надежности применяемой аппаратуры.

Применяются методы управления положением инструмента относительно заготовки [124, 125, 134], с их помощью решают некоторые технологические задачи управления точностью, в основном линейного и диаметального размера. Для управления погрешностью формы детали быстродействие привода исполнительного механизма, как правило, является недостаточным.

Управление режимами резания применяется в адаптивных системах и направлено обычно на стабилизацию силового параметра за счет изменения скорости подачи, на снижение уровня вибрации за счет изменения частоты вращения заготовки или инструмента [125, 139, 140, 142, 151].

В работах Петракова Ю.В. [82, 83] разработаны CAD/CAM-системы автоматизированного проектирования программ для станков с ЧПУ, проведена оптимизация технологических систем. Доказано, что производительность черновой обработки зависит от глубины резания, причем зависимость носит экстремальный характер. Предложен алгоритм автоматического поиска

экстремума по глубине резания и формирования траекторий движения резца на черновых проходах. Разработанный модуль САМ-системы в автоматическом режиме определяет частоту вращения шпинделя и продольную подачу, которые обеспечивают минимально возможное время обработки, и генерирует управляющую программу для станка с ЧПУ.

Однако перечисленные работы относятся, в основном, к легкому и среднему станочному оборудованию. Адаптивное управление для тяжелых станков практически не реализовано.

В адаптивных системах широко используется рабочая информация для анализа динамического состояния системы, организации изменения параметров, управляющих воздействий, структуры управляющего устройства в процессе нормального функционирования системы. Учитывая это, выделяют два класса адаптивных систем: самонастраиваемые и самоорганизующиеся. Самонастраиваемые системы – такие, в которых на основе рабочей информации осуществляется активная смена параметров управляющего устройства с целью обеспечения требуемого режима работы замкнутой системы.

Самоорганизующиеся или самоалгоритмизованные системы характеризуются тем, что в процессе адаптации не только изменяются параметры устройства управления, но и его структура, что приводит к изменению алгоритма управления.

На сегодня наиболее разработаны самонастраиваемые системы, поэтому в литературе этот класс систем часто называют обобщающим термином «адаптивные системы».

Различают адаптивные САУ со стабилизацией и оптимизацией качества управления. В первом случае САУ поддерживает заданные значения критерия качества функционирования объекта при изменении параметров последнего и внешних условий. Во втором случае показатель качества должен достигать экстремального значения при изменении условий работы.

Наиболее перспективным представляется повышение точности обработки

с помощью систем адаптивного управления замкнутого типа, которые еще называют системами управления по результатам измерения выходного параметра. Они способны поддерживать исходную величину на заданном уровне независимо от дестабилизирующих факторов. Эффективность систем управления такого рода во многом зависит от правильности выбора управляемого параметра.

Особенно актуален этот вопрос для тяжелых станков благодаря ряду специфических особенностей их проектирования и эксплуатации. В первую очередь, это преимущество весовых нагрузок над силами резания, как от обрабатываемого изделия, так и от веса собственных узлов. Кроме того, это преимущественно сборные конструкции корпусных элементов и направляющих, вносит дополнительные погрешности сборки, вызывает значительные контактные деформации и переменные во времени внутренние напряжения, а также ограничения жесткости конструкции значением приемлемой металлоемкости, крупные тепловые деформации через внушительные габариты и ряд других особенностей.

На точностные характеристики обработки влияет множество взаимозависимых факторов. Для тяжелых станков наибольшее значение имеют следующие группы погрешностей:

- геометрические;
- упругие, связанные с жесткостью технологической системы;
- температурные;
- погрешности, связанные с износом инструмента;
- погрешности позиционирования, характеризующиеся ошибкой вывода суппорта станка в заданную точку по одной или несколькими координатам.

Обычно рассматривают три способа достижения заданной точности:

- повышение качества технологической системы за счет повышения ее жесткости, прочности, качества изготовления, теплостойкости, износостойкости, виброустойчивости и т. д.;

- подавление действующих негативных факторов за счет введения более «мягких» режимов резания;
- уровень автоматизации процесса резания и функций контроля;
- управление ходом технологического процесса.

Для случая обработки на тяжелых токарных станках наибольшую проблему представляют погрешности, вызванные геометрическими погрешностями направляющих продольного перемещения, геометрическими погрешностями опор шпинделя, а также упругими деформациями шпиндельной группы, суппорта и заготовки. Следовательно, можно сделать вывод, что обязанности системы адаптивного управления тяжелого токарного станка состоят в обеспечении точности траекторий перемещения инструмента относительно установочных баз изделия и независимости точности этих траекторий от внешних факторов, в том числе от геометрических погрешностей изготовления и сборки узлов станка и силовых нагрузок любого характера.

В теории автоматического управления известно два способа решения этой задачи, определяющие структуру системы управления, с помощью незамкнутой и замкнутой системы автоматического регулирования. Оба способа имеют недостатки, поэтому рассмотрим их подробнее. Суть незамкнутой системы регулирования (рис. 1.13) заключается в том, что к основному сигналу регулирования добавляются сигналы от датчиков, регистрирующих внешние воздействия, преобразуемые с соответствующим законом, в результате чего эти дополнительные сигналы оказывают на объект регулирования действие, обратное действия соответствующего фактора. Теоретически этот метод совершенен, однако при практической реализации нельзя учесть все возможные факторы, которые возмущают, для некоторых не разработаны приемлемые способы измерения, и очень сложно создать преобразователи с адекватным законом преобразования. На практике этот способ распространения не получил из-за сложности оборудования и неуниверсальность.

В замкнутой системе (рис. 1.14) осуществляется измерение только выходного параметра, сравнение его с заданным значением и коррекция

управляющего воздействия к достижению равенства действительного значения выходного параметра с заданным. Такая система оказывается очень простой при практической реализации, но ее возможности ограничиваются одним недостатком, в этой системе неизбежно существует запаздывание сигнала коррекции относительно момента изменения выходного параметра.

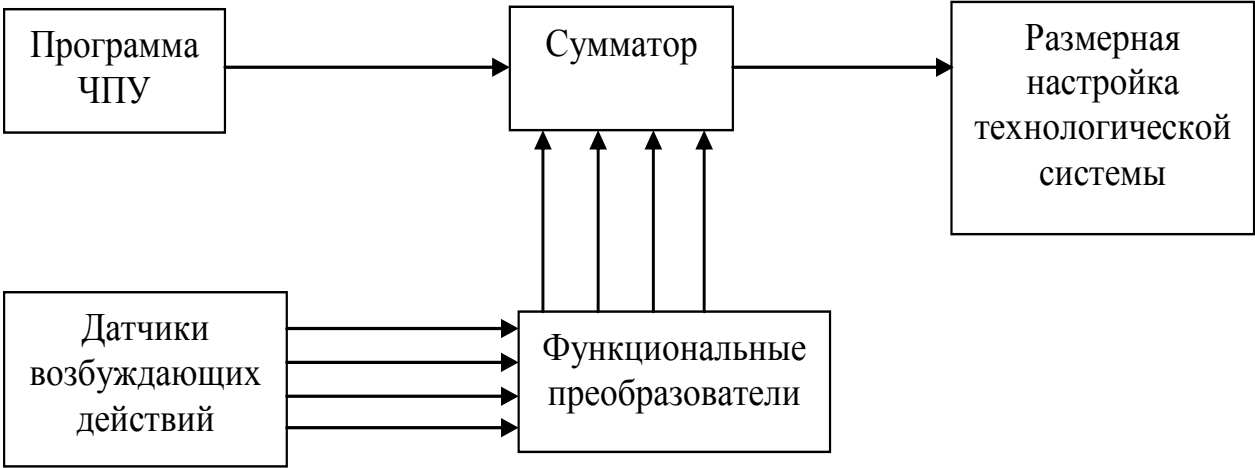


Рис. 1.13. Схема незамкнутой системы адаптивного управления

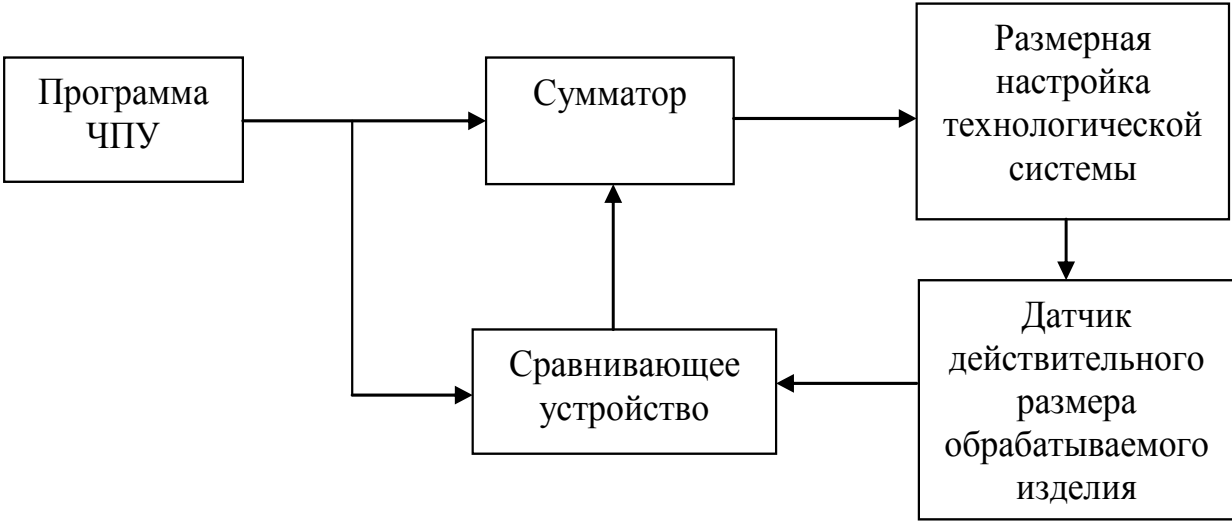


Рис. 1.14. Схема замкнутой системы адаптивного управления

С учетом особенностей рассмотренных выше факторов, оказывающих основное влияние на погрешности формы поверхности изделия, а именно отсутствие у них быстроменяющихся процессов, последний способ вполне можно считать приемлемым для применения на тяжелых токарных станках.

Разработаны методы адаптивного управления точностью тяжелого оборудования, основанные на текущем измерении действующих сил и относительных перемещений рабочих органов станка в процессе обработки [63, 64, 118].

Наиболее эффективны для этих целей - адаптивное управление точностью траектории движений подач по эталонной поверхности, в качестве которой применяется луч лазера (рис.1.15); адаптивные гидростатические опорные узлы; система компенсации упругих деформаций технологической системы (включая обрабатываемое изделие) по результатам предыдущего измерения геометрических параметров заготовки и последующем адаптивном управлении взаимным расположением инструмента и обрабатываемого изделия по несогласованности текущей глубины резания с расчетным значением.

Возможность современных систем ЧПУ позволяет использовать пре- и постпроцессоры, а также информацию от измерительных преобразователей, фиксирующих параметры процесса обработки (температуру, силы, крутящие моменты, вибрации и др.).

С помощью этих средств, в процессе обработки динамически корректируется изначальная программа ЧПУ с режимными параметрами и геометрией инструмента. Оптимальное адаптивное регулирование базируется на полной динамической исходной модели процесса резания. Оптимизация осуществляется во время всего процесса обработки и гарантирует оптимальное проведение процесса резания. Постоянное определение мгновенного положения оптимальной рабочей точки в соответствии с мгновенным состоянием процесса резания осуществляется постоянным сравнением актуальных значений характерных величин параметров.

Общая структура процесса оптимизации представлена на рисунке 1.16.

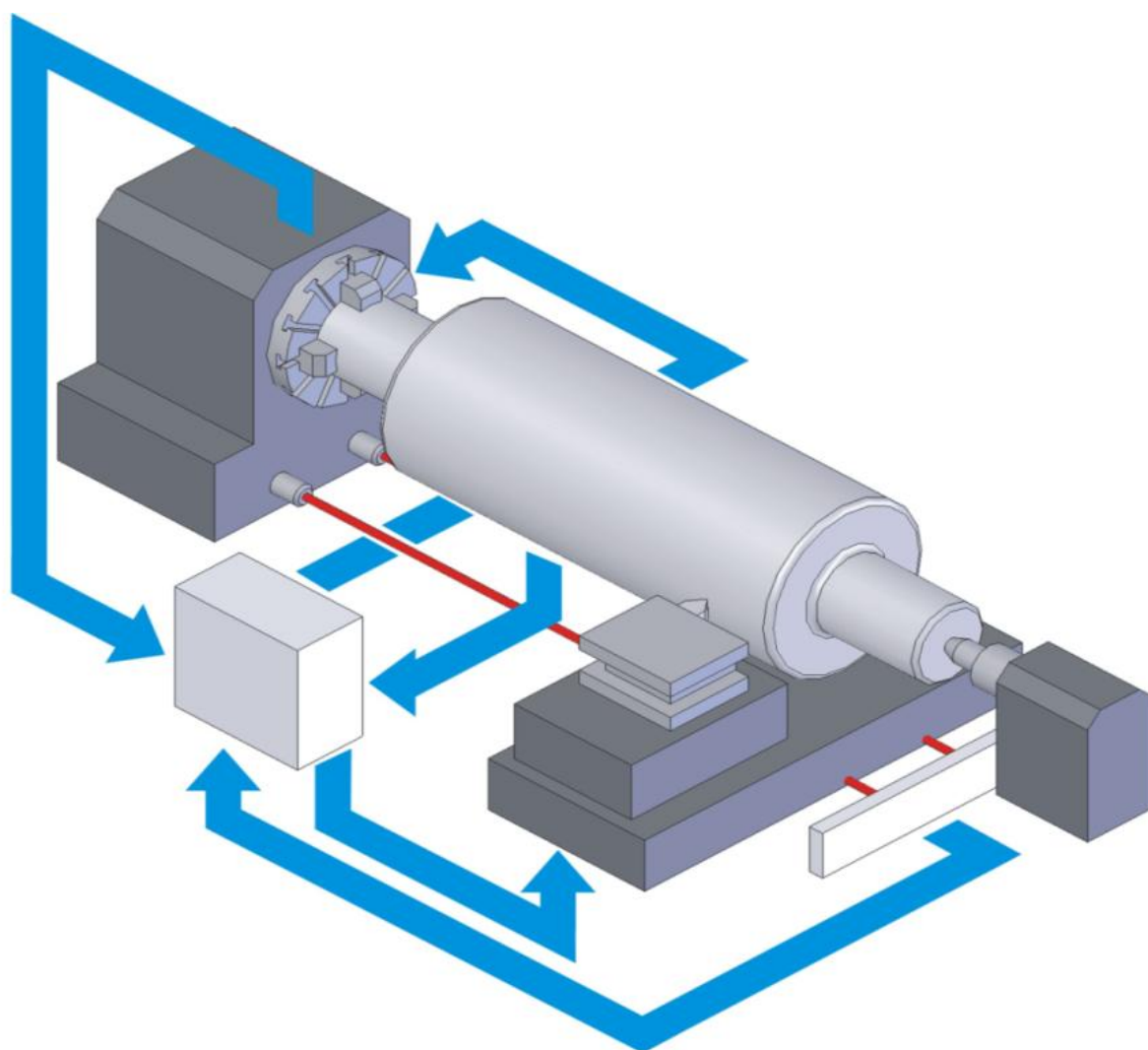


Рис. 1.15. Система адаптивного управления точностью движений подачи лазерным лучом для тяжелого токарного станка

Предложенная схема представляет собой новый подход к управлению процессом резания на тяжелых станках и оптимизации его параметров. Разработанная методология позволяет оптимизировать режимы резания и геометрию режущего инструмента в процессе адаптивного управления тяжелым токарным станком. Оптимальное адаптивное регулирование базируется на полной динамической исходной модели процесса резания. Оптимизация режимов резания осуществляется во время всего процесса обработки и гарантирует оптимальное проведение процесса резания.



Рис. 1.16. Общая схема оптимизации при адаптивном управлении процессом резания на тяжелых станках

Адаптивное управление процессами резания должно строиться на базе многоуровневой системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта [59, 61, 65-67, 114, 131, 161]. Значения критериев для оптимального адаптивного регулирования представляют экстремальные значения критериев оптимальности процесса резания, соответствующих целевым функциям статистической оптимизации.

Выводы по главе 1 и постановка задач исследований

1. Анализ условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения показал, что стохастический характер динамических процессов станков, а также большое рассеивание свойств обрабатываемых и инструментальных материалов и других параметров условий обработки приводит к необходимости статистических исследований параметров обработки на предприятиях тяжелого машиностроения.

2. Появление новых инструментальных и обрабатываемых материалов, совершенствование технологических процессов требует пополнения банка данных о параметрах обработки крупногабаритных деталей.

3. Установлено, что оптимизация параметров качества работы технологической системы - многопараметрический и многокритериальный процесс, который должен осуществляться на основе математических моделей, которые определяются на основе данных лабораторных, производственных и статистических экспериментов.

4. При разработке нормативов резания необходимо учитывать все факторы процесса резания: характеристики станка, детали, инструмента, надежность технологической системы, уровень качества процесса эксплуатации.

5. Установлено, что, несмотря на накопленный опыт в теории и практике конструирования тяжелых станков с адаптивным управлением, есть ряд нерешенных вопросов, как в области определения их рациональных конструктивных параметров, так и в области теории обеспечения оптимального протекания процесса резания.

6. Недостаточность информации на этапе проектирования тяжелых станков и научно обоснованных рекомендаций, направленных на решение проблемы сбалансированности характеристик станков и потребностей предприятий тяжелого машиностроения приводит к расточительному расходованию материальных и энергетических ресурсов.

7. Для нормирования работ на тяжелых токарных станках наибольшее применение находят нормативы. Большинство действующих нормативов рассчитаны на применение универсального оборудования и не имеют рекомендаций по режимам резания для станков с ЧПУ. Программное обеспечение и технические средства, способствующие надежному выбору оптимального режима резания на тяжелых станках, требуют усовершенствования.

8. Проанализированы современные средства и научные подходы к обеспечению адаптивного управления процессом резания на тяжелых станках. Установлено, что структура адаптивной технологической системы должна иметь высокую степень охвата обратными связями по относительно положению и траекториями формообразующих движений элементов системы; их физическим состоянием и факторами, возмущают.

9. Выявлено, что адаптивное управление процессами резания должно строиться на базе многоуровневой системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта.

Исходя из изложенного, определена цель работы – разработка научных основ проектирования станков для обработки деталей тяжелого машиностроения на основе адаптивного управления

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить такие задачи:

1. Проанализировать особенности предприятий тяжелого машиностроения, номенклатуру обрабатываемых деталей, технологические процессы их изготовления, применяемое оборудование

2. Создать базу знаний о прецедентах обработки деталей тяжелого машиностроения.

3. Разработать методологию структурно-параметрического синтеза тяжелых станков на основании созданной базы знаний.

4. Выявить значимые параметры и разработать математические модели для реализации системы адаптивного оптимального управления

процессом механической обработки на тяжелых станках. Разработать нормативы режимов резания для тяжелых станков с ЧПУ

5. Разработать схемы, принципы работы конструкции мехатронных станочных узлов, измерительных и диагностических средств для реализации адаптивного управления.

6. Разработать и внедрить многоуровневую систему принятия решений с элементами искусственного интеллекта для автоматического управления процессами резания на адаптивном оборудовании.

7. Внедрить результаты исследований при разработке новой гаммы тяжелых токарных станков с ЧПУ.

2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящем разделе рассмотрены вопросы методологии создания и исследования токарных станков для обработки деталей тяжелого машиностроения; общие условия, оборудование и приборы, использованные в экспериментальных исследованиях; представлены используемые методики, рассмотрены результаты разработки оригинальных методик; статистическая обработка результатов исследований и использование пакетов прикладных программ.

Структура работы приведена на рис. 2.1. На основе анализа условий обработки крупногабаритных деталей, методов определения рациональных конструктивных параметров тяжелого металлорежущего оборудования и рациональных параметров процесса резания формируется база знаний о параметрах механической обработки на станках в условиях тяжелого машиностроения.

С использованием базы знаний формируется система принятия решений при адаптивном управлении процессом механической обработки на тяжелых станках с учетом состояния инструмента в технологических системах оптимального регулирования и система адаптивного управления процессом механической обработки.

На основе разработки принципов проектирования сформированы рекомендации по проектированию тяжелых токарных станков с ЧПУ. Внедрение результатов работы в конструкции тяжелых токарных станков нового поколения позволяет разработать научные основы проектирования станков для обработки деталей тяжелого машиностроения с адаптивным управлением.

2.1 Методика анализа условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения

Сбор статистической информации о деталях, технологических операциях и режимах резания осуществлялся методами мгновенных наблюдений, методом

длительных наблюдений и с помощью анализа состояния списанного инструмента.

Методика статистических исследований предприятий тяжелого машиностроения предусматривает на основе созданной базы знаний с использованием методов математической статистики осуществлять группировку данных по заданному признаку, определять параметры законов распределения, производить регрессионный и корреляционный анализ данных, выявлять необходимые параметры оборудования, оптимизировать режимы резания.

Метод моментных наблюдений состоит в определении вероятностей тех или иных условий обработки путем их фиксирования наблюдателем в равномерно распределенные случайные моменты времени.

Наблюдения должны производиться в течение периода времени, позволяющего отразить всю номенклатуру выпускаемых изделий. Наблюдение состоит в фиксировании и занесении в протокол информации об условиях механической обработки на данном рабочем месте в данный случайный момент времени. При этом в протоколе делается только одна запись, отражающая условия обработки и именуемая наблюдением.

Рекомендуется следующая организация наблюдений:

Выбрать объекты (рабочие места) наблюдений. Если на участке (в цехе) содержится менее 30 станков, в выборку включить все станки. Выборка объектов наблюдения должна равномерно охватывать все установленное оборудование токарной группы. Выбранные объекты пронумеровать.

Составить схемы маршрутов обхода (последовательность из номеров объектов, например: 2-10-1-6-13-15-..., которые отражают порядок обхода);

Маршруты обходов пронумеровать.

Для осуществления каждого обхода номер маршрута выбрать в случайном порядке.

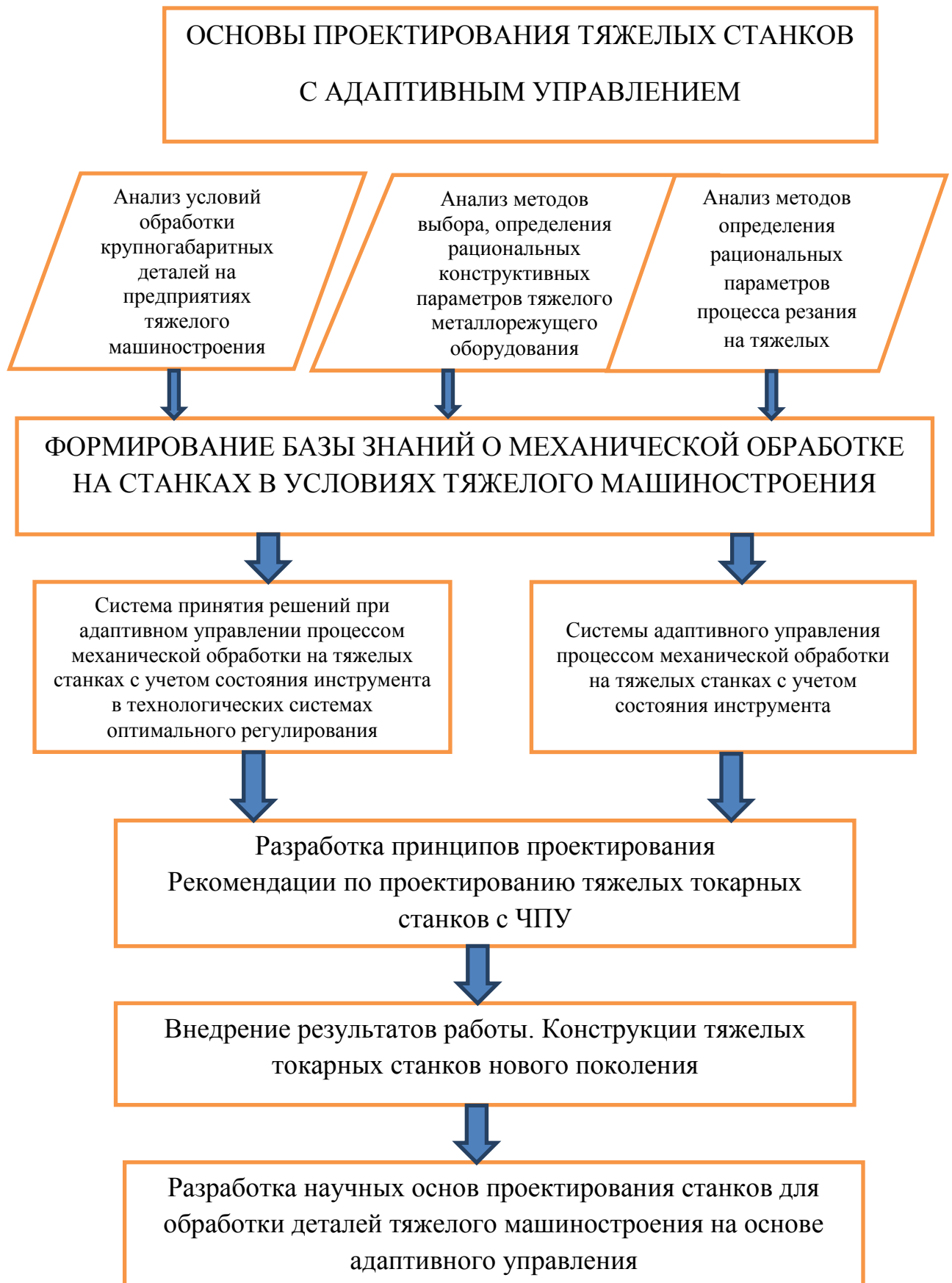


Рис. 2.1. Структура диссертационной работы

Табл. 2.1. Протокол информации об условиях механической обработки

Номер наблюдения	Станок		Операция, переход	Обрабатываемый материал			Характер обработки	Характеристика припуска и поверхности заготовки	Резец			Режимы резания			Диаметр обработки, мм
	Тип	D_c , мм		Марка	Твердость HB	Твердость HRC			Инструментальный материал	Высота державки H , мм	СМП или напайный	Средняя глубина t , мм	Подача s , мм/об	Частота вращения n , об/мин	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6
Данные собрал: Ф.И.О. Подпись							Дата		Данные проверил: Ф.И.О. Подпись						

Информация, заносимая в протокол формы 1, позволяет отнести каждое наблюдение к той или иной группе условий и включает следующее:

Графа 1. Номер наблюдения по порядку в данном протоколе.

Графа 2. Тип станка (токарный или карусельный).

Графа 3. Наибольший диаметр обрабатываемой детали над станиной станка D_c (паспортное данное).

Графа 4. Вид операции (токарная); вид перехода (продольное наружное точение, подрезка, растачивание больших и малых отверстий, контурное точение, фасонное точение, отрезка, прорезка, нарезание резьбы).

Графа 5. Марка обрабатываемого материала.

Графа 6. Твердость обрабатываемого материала (HB).

Графа 7. Твердость обрабатываемого материала (HRC) для закаленных сталей.

Графа 8. Характер обработки (черновая или чистовая).

Графа 9. Характер припуска и поверхности заготовки (непрерывный и прерывный, с коркой или без корки).

Графа 10. Марка инструментального материала.

Графа 11. Высота державки резца H , мм.

Графа 12. Вид конструкции резца (СМП или напайный).

Графа 13. Средняя глубина резания t , мм.

Графа 14. Подача s , мм/об.

Графа 15. Частота вращения n , об/мин.

Графа 16. Диаметр обработки на наблюдаемом переходе, мм.

Определение объема выборки и ее статистическая обработка. Конечная совокупность наблюдений (выборка) отражает характеристики генеральной совокупности лишь с некоторой точностью. Для получения статистических оценок объема механической обработки в различных группах условий и применимости в них резцов с СМП заданная точность выборки должна быть достаточной.

Представительность выборки означает, что в соответствии с целями организации сбора данных осуществлен случайный отбор объектов наблюдения, обеспечена случайность моментов наблюдений, а также то, что объем выборки (количество наблюдений) соответствует предъявляемым требованиям к точности результатов.

Определение статистических оценок X_ϕ и Y_ϕ . Величина X_ϕ представляет собой статистическую оценку вероятности данной группы условий механической обработки на предприятии. Степень ее близости к истинной вероятности оценивается доверительным интервалом вероятности I_β с заданным коэффициентом доверия β , зависит от объема выборки N и самой величины статистической оценки X_ϕ .

Статистическую оценку доли каждой из групп условий в суммарном основном времени работы оборудования определяют по формуле

$$X_\phi = \frac{n_\phi}{N}, \quad (2.1)$$

где N – общее количество наблюдений; n_{ϕ} – количество наблюдений, отнесенных по содержащейся в них информации к данной группе условий.

Величина Y_{ϕ} является статистической оценкой вероятности обработки в данной группе условий резцами с СМП. Ее точность также оценивается доверительным интервалом вероятности I_{β} , зависящим от объема выборки N , коэффициента доверия β и статистической оценки Y_{ϕ} .

Статистическую оценку Y_{ϕ} , имеющей место фактической применимости резцов с СМП в каждой конкретной группе условий определяют по формуле

$$Y_{\phi} = \frac{n_{\phi c}}{n_{\phi}}, \quad (2.2)$$

где $n_{\phi c}$ – количество наблюдений, отнесенных к данной группе условий, в которых обработка велась резцами с СМП.

Теоретической основой метода моментных наблюдений является схема повторных независимых испытаний, приводящая к биномиальному распределению числа появления события A в N независимых опытах, если в каждом из них вероятность его появления составляет P . В настоящем случае вероятность P представляет собой вероятность того, что наблюдение будет отнесено к определенной группе условий.

Для расчета экономического эффекта необходим объем металла Q , снимаемый в данной группе условий, который определяется следующим образом:

- по выборке наблюдений n_{ϕ} , относящихся к этой группе условий, определить среднюю скорость $v_{\text{ср}}$, среднюю подачу $s_{\text{ср}}$ и среднюю глубину резания $t_{\text{ср}}$;
- рассчитать средний минутный съем металла, $\text{м}^3/\text{мин}$, в данной группе условий $Q_{\text{м}}$ по формуле:

$$Q_m = \frac{v_{cp} t_{cp} s_{cp}}{10^6}, \quad (2.3)$$

— объем металла, снимаемый в данной группе условий, m^3 , определить по формуле:

$$Q = 60 Q_m \Sigma t_{ory} \quad (2.4)$$

Определение точности статистических оценок и объема выборки.

Для определения точности статистических оценок P^* вероятности P по данным выборки, содержащей N наблюдений, а также для определения необходимого объема выборки N , обеспечивающего заданную точность оценивания вероятности P , используются номограммы (см. рисунки приложения А). Рекомендуется принимать коэффициент доверия $\beta = 0,9$. Номограммы, построенные по данным [21], а также на основе расчетов, выполненных в ДГМА, представлены в приложении А.

Доверительный интервал вероятности $I_{0,9}$ с коэффициентом доверия $\beta = 0,9$ определяют с использованием номограммы, представленной в приложении А на основе общего количества наблюдений N и статистической оценки X_ϕ (Y_ϕ). Для этого по оси P^* откладывается величина X_ϕ (Y_ϕ), в полученной точке восстанавливается перпендикуляр до пересечения с парой кривых, соответствующих данному количеству наблюдений N . Из точек пересечения проводят горизонтальные линии, дающие верхний доверительный предел P_v для вероятности P и нижний доверительный предел P_n . Доверительный интервал для вероятности P , не противоречащий полученной в результате наблюдений N статистической оценке P^* , определяют по формуле:

$$I_{0,9} = P_v - P_n. \quad (2.5)$$

Согласно [9] в этом случае вероятность выполнения неравенства $|P^* - P| \leq I_{0,9}$ составляет 0,9. При этом ошибка, связанная с заменой истинной вероятности P ее статистической оценкой (частотой) P^* , в 90% случаев по абсолютной величине не превысит найденного значения $I_{0,9}$. При несоответствии предъявляемым требованиям полученной в результате серии наблюдений точности определения вероятности P назначают дополнительное количество наблюдений, которые необходимо осуществить для достижения заданной точности $[I_{0,9}]$. Если в результате N_1 наблюдений получена статистическая оценка P_1^* , которой соответствует доверительный интервал $I_{0,91}$, причем $I_{0,91} > [I_{0,9}]$, следует воспользоваться номограммой. По этой номограмме в зависимости от имеющейся статистической оценки P_1^* и требуемого значения доверительного интервала $[I_{0,9}]$ определяют новое значение общего количества необходимых наблюдений $N_2 > N_1$. Дополнительное количество ΔN_1 к имеющимся N_1 наблюдениям находят по формуле:

$$\Delta N_1 = N_2 - N_1. \quad (2.6)$$

Необходимым условием применимости описанного способа определения объема выборки N является предварительная серия наблюдений с целью ориентировочного расчета статистической оценки P^* .

В случае отсутствия предварительной информации о статистической оценке для определения необходимого объема выборки N используют номограмму (см. приложение Б), основанную на зависимости доверительного интервала $I_{0,9}$ от числа реализаций (объема выборки) N и априорной вероятности P_a .

В этом случае перед сбором статистических данных задаются минимальной априорной вероятностью группы условий $P_{a_{\min}}$ (табл. 2.2). Значимыми будут считаться лишь те группы условий, для которых:

$$P \geq P_{a_{\min}}, \quad (2.7)$$

где P – истинная вероятность группы условий.

Табл. 2.2. Значения $P_{a_{\min}}$ для различных типов производства

Тип производства	Индивидуальное, мелкосерийное	Серийное	Крупносерийное, массовое
Минимальная априорная вероятность $P_{a_{\min}}$	0,001...0,005	0,01	0,05...0,1

Расчет ведут, задаваясь максимальной относительной погрешностью ψ_{\max} .
Рекомендуется принимать: $\psi_{\max} = 0,05 \dots 0,2$.

Относительную погрешность ψ определяют по формуле:

$$\psi = \frac{I_{0,9}}{P_a}. \quad (2.8)$$

Тогда при заданных значениях $\psi = \psi_{\max}$ и $P_a = P_{a_{\min}}$ наибольший допустимый доверительный интервал:

$$[I_{0,9}] = \psi_{\max} P_{a_{\min}}. \quad (2.9)$$

Вычисленное значение $[I_{0,9}]$ используют в расчете необходимого объема выборки N . Для этого величина $[I_{0,9}]$ откладывается по оси ординат. Из найденной точки проводят горизонтальную линию до пересечения с кривой выбранного значения $P_a = P_{a_{\min}}$. Опуская из точки пересечения перпендикуляр на ось абсцисс, определяют значение N . Это значение обеспечивает для всякой

Метод заключается в непрерывном наблюдении за эксплуатацией режущей пластины с момента ее первой установки на резец до момента ее неустранимого отказа. Метод требует непрерывного присутствия наблюдателя на рабочем месте. Если имеется возможность, он наблюдает за двумя-тремя инструментами, работающими на одном или соседних станках.

В каждое наблюдение, фиксируемое в протоколе, заносится информация об эксплуатации новой грани или вновь заточенной пластины до ее отказа (износ до критерия притупления, выкрашивания, скола или поломка пластины).

Табл. 2.3. Форма 2. Протокол сбора данных методом длительных наблюдений

	Номер наблюдения	Номер чертежа, наименование детали	Обрабатываемый материал			Характер припуска и поверхности заготовки	Модель и инвентарный номер станка	Основная характеристика станка D _с , мм	Резец				Операция переход	D _{пр} х, мм	D _{пр} х, мм
			Марка	σв или HB, HRC	Характер обработки				Тип	Тип конструкции	Высота державки H, мм	Марка твердого сплава			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Окончание таблицы 2.3

t _{min} / t _{max}	s, мм/об	n, об/мин	v, м/мин	Вылет ползуна (начальный, конечный), мм	Машинное время t _м перехода, мин	Время работы резца на переходах τ, мин	Т или T _{прив} , мин	Вид отказа	Размеры износа, мм		Размеры разрушения, мм			Эскиз детали
									δ _{max}	l _{max}	h _p	δ _p	a _p	
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Графа 1. Номер наблюдения по порядку в данном протоколе.

Графа 2. Номер чертежа по технологической документации (наименование детали по документации).

Графа 3. Марка материала детали из чертежа.

Графа 4. Напряжение σ_B – для деталей после отжига; твердость HB, HRC – для операций после термообработки (в соответствии с технологической документацией).

Графа 5. Характер обработки (чистовая или черновая).

Графа 6. Характер припуска и поверхности заготовки (непрерывный, прерывный, с коркой или без корки).

Графа 7. Модель и инвентарный номер станка (из таблички на станке).

Графа 8. Наибольший диаметр обрабатываемой детали D_C .

Графа 9. Тип резца – проходной, расточный, упорный, отрезной, галтельный.

Графа 10. Тип конструкции резца – с напаянной вставкой УЗТМ, с напаянной вставкой ВНИИ, с механическим креплением (прихватом, с плоским клином, l-образным рычагом, клин-прихватом и т. д.).

Графа 11. Высота державки резца H , мм.

Графа 12. Марка твердого сплава – Т5К10, ТТ7К12 и т. д.

Графа 13. Наблюдаемые переходы и проходы (продольное точение, подрезка, отрезка, расточка и т. д.).

Графа 14. Диаметр обрабатываемой поверхности заготовки на данном переходе.

Графа 15. Длина обрабатываемой поверхности (фактическая на данных режимах) на данном проходе.

Графа 16. Минимальная и максимальная глубины резания (определяется непосредственным измерением на детали).

Графа 17. Подача, измеренная по гребешкам на поверхности или перемещению суппорта, – s , мм/об.

Графа 18. Частота вращения шпинделя n , об/мин (измеряется по секундной стрелке часов – тяжелые станки либо по табличке на станке – средние станки).

Графа 19. Скорость резания (рассчитывается по наибольшему диаметру, при отрезке – по наибольшему и наименьшему, v_{\max} / v_{\min}).

Графа 20. Начальный и конечный вылет ползуна (для карусельного станка).

Графа 21. Машинное время перехода, мин, рассчитывается по формуле

$$\tau_M = \frac{l}{n s}, \quad (2.10)$$

где l – длина прохода, мм; s – подача, мм/об; n – число оборотов, об/мин.

Графа 22. Время работы резца на переходе равно τ_M (см. графу 21), если резец проработал до конца прохода. В тех случаях, когда резец снимается, не окончив проход, – рассчитывается для фактической длины обработки.

Графа 23. Стойкость резца T , мин, в случае, если обработка ведется с постоянными режимами резания; $T_{\text{прив}}$ рассчитывается при работе инструмента

с режимами резания t_i , v_i , s_i , изменяющимися от перехода к переходу, тогда режимы резания перехода максимальной длины считаются базовыми. При соизмерении длины обработки по всем переходам за базовые принимают режимы последнего перехода, на котором произошел отказ инструмента.

Приведенное значение времени работы на данном i -том переходе определяется по формуле:

$$\tau_{прив i} = \tau_i \left(\frac{v_i}{v_{прив}} \right)^{m_1} \left(\frac{s_i}{s_{прив}} \right)^{m_2} \left(\frac{t_i}{t_{прив}} \right)^{m_3}, \quad (2.11)$$

где $v_{прив}$ – базовая скорость резания; $s_{прив}$ – базовая подача;
 $t_{прив}$ – базовая глубина резания; $m_1 = 3$; $m_2 = 1,05$ (если $s \leq 0,7$); $m_2 = 1,36$ (если $s > 0,7$); $m_3 = 0,45$.

Далее определяется общее приведенное время работы инструмента на данной операции:

$$T_{прив} = \sum_{i=1}^n t_{прив i}, \quad (2.12)$$

где n – число переходов.

Графа 24. Вид отказа – износ, выкрашивание, скол, поломка, отпай пластинки, деформация, трещина.

Графа 25. Износ δ_{\max} стал максимальный по задней поверхности.

Графа 26. Износ l_{\max} максимальная глубина лунки на передней поверхности.

Графа 27. Толщина разрушения пластины h_p .

Графа 28. Ширина разрушения пластины δ_p .

Графа 29. Длина разрушения пластины a_p .

Минимальный объем наблюдений при проведении длительных наблюдений устанавливают в зависимости от требуемой точности получения результатов, выражаемой относительной ошибкой:

$$\sigma = \frac{t_{\beta} - T}{T}, \quad (2.13)$$

где t_{β} – верхняя односторонняя доверительная граница с доверительной вероятностью β .

Значения числа наблюдений N для закона Вейбулла-Гнеденко в зависимости от коэффициента вариации стойкости ν_T , относительной ошибки δ и доверительной вероятности β определяют по таблице, представленной в приложении Б.

Ориентировочное значение коэффициента вариации стойкости ν_T принимают по нормативам режимов резания [31]. Величины β и δ задают, пользуясь табл. 2.4.

Табл. 2.4. Значения относительной ошибки δ и доверительной вероятности β в зависимости от условий производства

Оборудование	Тип производства					
	Индивидуальное, мелкосерийное		Серийное		Крупносерийное, массовое	
	δ	β	δ	β	δ	β
Универсальные станки	0,2	0,8	0,15	0,8		
Станки с ЧПУ	0,2	0,9	0,15	0,9	0,1	0,9
Автоматизированное оборудование					0,1	0,95

Проведя полученное количество наблюдений N , выполняют их статистическую обработку.

Вновь найденное после статистической обработки значение коэффициента вариации стойкости v_T используют для определения соответствующего ему количества наблюдений N_2 . Если $N_2 \leq N_1$, расчет считается окончанным. При этом все полученные в результате статистической обработки характеристики удовлетворяют заданной точности. Если $N_2 > N_1$, проводят дополнительно $\Delta N = N_2 - N_1$ наблюдений. Расчет повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие $N_{i+1} \leq N_i$.

Обработка результатов наблюдений. Ниже приведена последовательность статистической обработки результатов сбора информации и определения параметров распределения стойкости.

Результаты наблюдений (значения стойкости T_i в i -м наблюдении) ранжируют (располагают по возрастанию абсолютной величины). Полученный ряд называется вариационным.

Рассчитывают среднюю стойкость T :

$$T = \frac{1}{N} \sum T_i, \quad (2.14)$$

где N – объем наблюдений.

Находят среднеквадратическое отклонение σ по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (T_i - T)^2}. \quad (2.15)$$

Проводят анализ исходных данных на содержание выпадающих результатов. Для этого вычисляют критерий Смирнова U :

$$U_1 = \frac{T - t_{\min}}{\sigma} \quad (2.16)$$

ИЛИ

$$U_n = \frac{t_{\max} - T}{\sigma}, \quad (2.17)$$

где t_{\min} – наименьшее значение вариационного ряда; t_{\max} – наибольшее значение вариационного ряда.

Вычисленное значение сопоставляют с критическим U_K для заданной доверительной вероятности β (табл. 2.5).

Число интервалов разбиения I и величину интервала Δt рассчитывают по формулам:

$$I = 1 + 3,32 \lg N, \quad (2.18)$$

$$\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{I}. \quad (2.19)$$

Табл. 2.5. Значение критерия U_K в зависимости от объема выборки

Объем выборки	Предельное значение U_K при доверительной вероятности		Объем выборки	Предельное значение U_K при доверительной вероятности	
	$\beta = 0,9$	$\beta = 0,95$		$\beta = 0,9$	$\beta = 0,95$
3	1,15	1,15	12	2,13	2,29
4	1,42	1,46	13	2,17	2,33
5	1,60	1,67	14	2,21	2,37
6	1,73	1,82	15	2,25	2,41
7	1,83	1,94	16	2,28	2,44
8	1,91	2,03	17	2,31	2,48
9	1,98	2,11	18	2,34	2,50
10	2,03	2,18	19	2,36	2,53
11	2,09	2,23	20	2,38	2,56

Определяют виды отказов и заполняют форму А (табл. 2.6).

Вариационный ряд разбивают на I интервалов. Если $t_{\min} < \Delta t/5$, рекомендуется первый интервал начать с нуля. Границы интервалов заносят в форму С. По формулам, приведенным в форме С, вычисляют и заносят статистические оценки показателей надежности: число отказов за интервал, число безотказных инструментов, частоту отказов (статистическую плотность распределения), интенсивность отказов и вероятность безотказной работы.

Табл.2.6. Форма А. Относительное количество отказов инструмента (к протоколу №...)

Вид отказа	Количество (в числителе) и доля (в знаменателе) отказов по переточкам (поворотам пластин) по номеру периода стойкости					
	1	2	3	4	5	Всего
Поломка						
Скол						
Выкрашивание						
Износ						
Всего						

Строят графики для статистической оценки показателя безотказности – $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ (рис. 2.2). Графически находят статистическую оценку $T\gamma$. Целесообразно принимать при этом вероятность безотказной работы $\gamma = 80\%$.

На основе анализа видов отказов, коэффициента вариации, характера кривой $f(t)$ (путем сравнения с графиками, изображенными на рис. 2.3) выдвигают гипотезу о законе распределения стойкости.

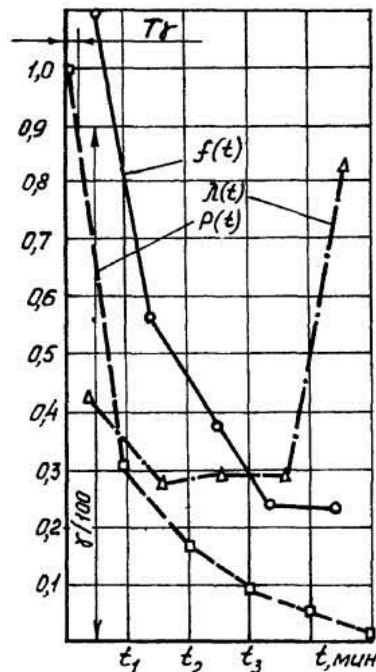
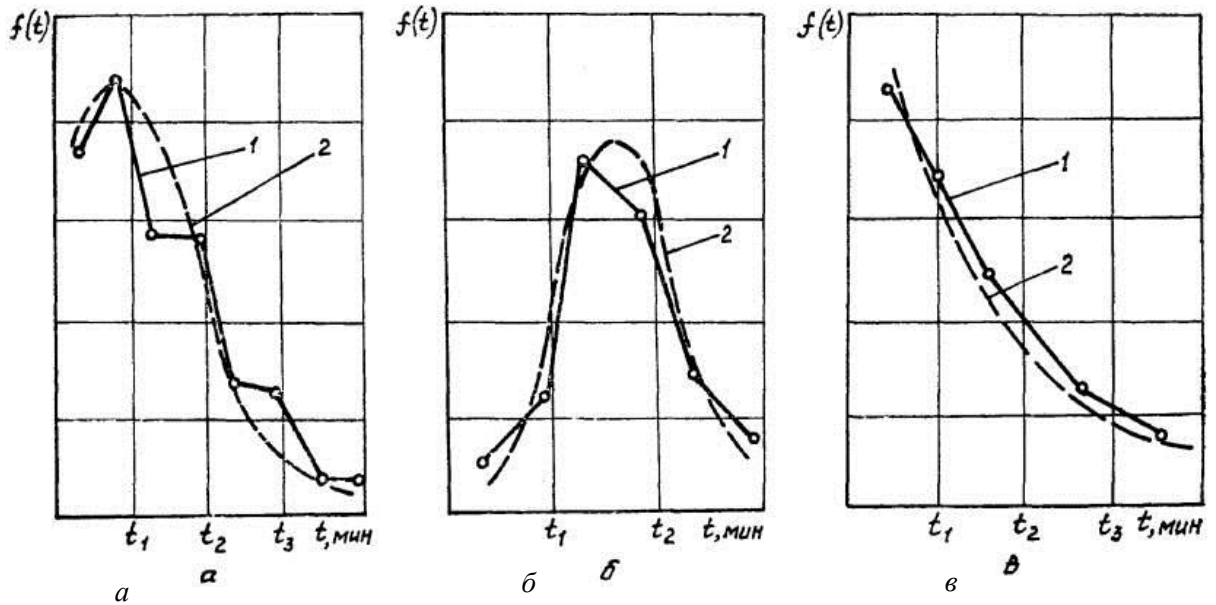


Рис. 2.2. Показатели безотказности



a – закон Вейбулла; *б* – бинормальный закон; *в* – экспоненциальный;

Рис.2.3. Графики плотности распределения

По формулам табл. 2.7 вычисляют теоретические показатели надежности инструмента.

Табл. 2.7. Теоретические показатели надежности инструмента

Закон распределения стойкости	Частота отказов (плотность вероятностей) $f(t)$	Интенсивность отказов $\lambda(t)$	Вероятность безотказной работы $P(t)$
Нормальный	$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t-T}{2\sigma^2}\right)^2}$	$\frac{e^{-\left(\frac{t-T}{2\sigma^2}\right)^2}}{\sqrt{2\pi} \sigma \Phi\left(\frac{T-t}{\sigma}\right)}$	$\Phi\left(\frac{T-t}{\sigma}\right)$
Вейбулла-Гнеденко	$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$	$\left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$	$e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$
Экспоненциальный	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$\lambda = 1/T$	$e^{-\lambda t}$

В формулах использованы обозначения: e – основание натурального логарифма; T, σ – параметры нормального закона; a, b – параметры закона Вейбулла-Гнеденко; λ – параметр экспоненциального закона; Φ – функция

Лапласа (функция нормального распределения $\Phi(x)$), определяется по таблице (см. приложение Б).

Проверку гипотез о характере закона распределения стойкости осуществляют с помощью критерия Пирсона в соответствии с формой С.

Точность определения средней стойкости оценивают с помощью доверительных интервалов. Формулы для определения доверительных границ с вероятностью приведены в табл. 2.8. Рекомендуется принимать: $\beta = 0,9$.

Табл. 2.8. Доверительные границы для стойкости

Закон распределения стойкости	Формулы для определения	
	Нижней границы	Верхней границы
Нормальный	$T - t_{\beta_1 N-1} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$	$T + t_{\beta_1 N-1} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$
Вейбулла-Гнеденко	$b\sqrt{r_3}$	$b\sqrt{r_1}$
Экспоненциальный	$r_3 T$	$r_1 T$

В формулах использованы обозначения: $t_{\beta_1 N-1}$ – коэффициент Стьюдента (табл. 2.7); σ – параметр нормального распределения; b – параметр распределения Вейбулла-Гнеденко; r_1, r_3 —коэффициенты, определяемые по табл. 2.13 и 2.14.

При этом среднее число периодов стойкости до неустранимого отказа определяется по формуле

$$K_{СМП} = \frac{n_0 0 + n_1 1 + n_2 2 + \dots n_i i}{n_{пл}}, \tag{2.20}$$

где $n_{пл}$ – количество пластин в выборке, $n_{пл} = \sum n_i$; i – число отработанных вершин, $i = 0, 1, 2, \dots$; n_i – число пластин в выборке, содержащих по i отработанных вершин.

Необходимый объем выборки $N = n_{пл}$, обеспечивающий заданную точность результатов, определяют аналогично методу моментных наблюдений.

Метод анализа состояния списанного инструмента состоит в статистическом анализе показателей фактического использования инструмента, который осуществляется по методике, изложенной в [97,98] с использованием протокола по форме 3 (табл. 2.9).

Табл. 2.9. Форма 3. Протокол анализа состояния списанного инструмента

Форма многогранной пластины	Типоразмер пластины	Марка материала, вид покрытия	Номер пластины	Номер вершины	Состояние вершины				Примечание
					Износ h_3 , мм	Поломка	Скол	Не работала	

2.2 Методы выбора определения рациональных конструктивных параметров тяжелого металлорежущего оборудования

Процесс проектирования тяжелого токарного станка, в наиболее полной мере отвечающего требованиям заказчиков, заключается в разработке его технологической структуры в виде функционально - структурной модели и обосновании основных технологических параметров (размеры рабочего пространства, требуемые усилия резания, необходимые режимы и т.п.). Построение функционально – стоимостной модели позволяет установить комплекс необходимых и достаточных (оптимальных) функций, реализуемых станком, и обеспечивающих их исполнительных механизмов.

Для исследования функций тяжелого станка и разработки его функционально – стоимостной модели применена методология, позволяющая построить функциональную модель процесса, определить его входы и выходы, установить взаимосвязи с другими процессами [42-43, 115, 122].

Для выбора эффективного оборудования на предприятии тяжелого машиностроения собирается информация о параметрах обработки, изучаются требования потребителей и необходимые ресурсы. Входными характеристиками служат данные о деталях, обрабатываемых на предприятии тяжелого машиностроения. Выходными характеристиками является функционально-стоимостная модель тяжелого станка. На этапе маркетинга определяются круг заказчиков и основные требования к оборудованию. На входе имеется множество подлежащих изготовлению в производстве заказчика деталей, а на выходе комплексная деталь – представитель, которая обобщает все конструктивные элементы, присущие деталям данной группы.

Следующим этапом является разработка технологических процессов и операций. Входом блока являются комплексные детали - представители, а выходом рациональные структуры технологических операций по их обработке. Выходы блоков разработки комплексной детали-представителя и структуры технологических операций являются входом процесса технологического проектирования тяжелого станка. Выходом этого блока является функционально-стоимостная модель станка (рис. 2.4), определяющая структуру и состав функциональных блоков по каждому станку, предназначенному для обработки определенной группы деталей. Разработанные функционально - стоимостные модели деталей являются входом процесса разработки технического задания и предложения для создания новых станков или выбора станка из существующей гаммы оборудования.

Из множества деталей, изготавливаемых на предприятии тяжелого машиностроения, формируется база знаний, которая позволяет выполнить всесторонний статистический анализ их конструктивно-технологических характеристик и выявить наиболее широко распространенные из них. Группирование деталей осуществляется по общности их конструктивно-технологических характеристик (геометрия поверхностей, размеры, точность и др.). Для исключения широкого разнообразия информации о характеристиках

деталей ее целесообразно выразить через интегрированный показатель. Таким показателем является сложность детали.

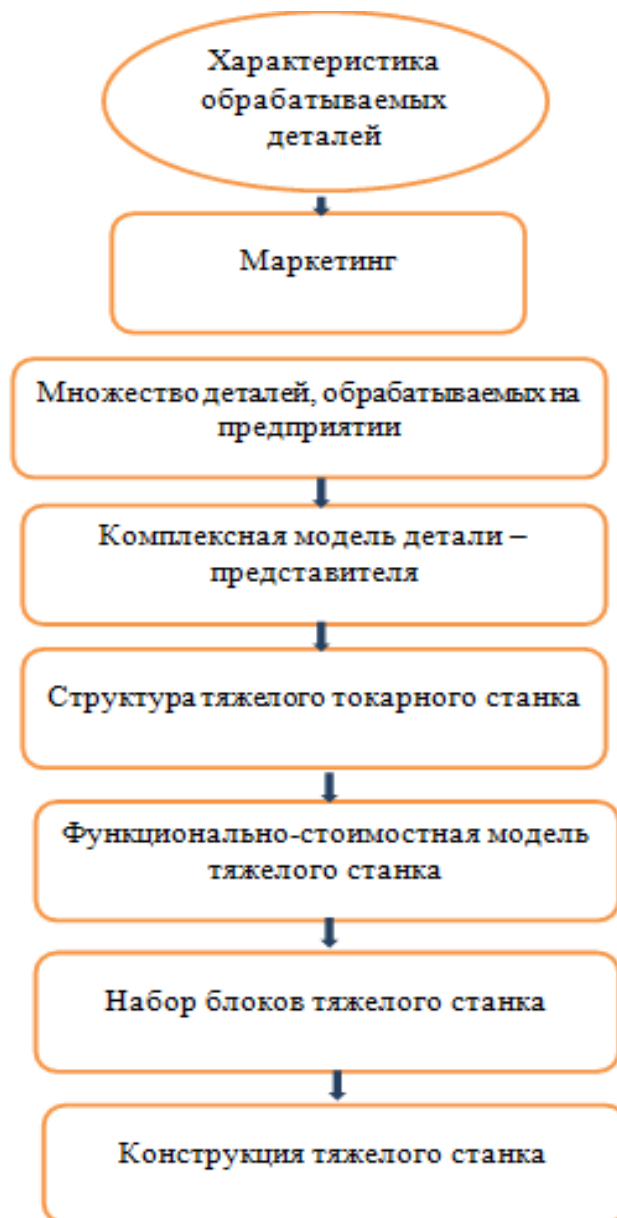


Рис. 2.4. Методика построения функционально-стоимостной модели тяжелого станка

2.3 Методы определения рациональных параметров процесса резания на тяжелых станках

Особенности обработки деталей на тяжелых станках, большие затраты материальных и психофизических ресурсов, вероятностный нестабильный характер резания требуют внедрения и усовершенствования адаптивных систем управления. Система адаптивного управления тяжелых станков создается как интегрированный комплекс, который включает тяжелый станок, системы инструментов и инструментообеспечения, систему адаптивного управления с комплектами измерительных и диагностических средств, математические модели функционирования технологической системы. Алгоритмы работы оптимальной системы адаптивного управления формируются с включением критериев: себестоимость обработки, производительность, точность, качество, надежность системы и др. Структура адаптивной технологической системы имеет высокую степень охвата обратными связями: по относительному положению и траекториям формообразующих движений элементов системы; их физическому состоянию и возбуждающим факторам.

Система обработки резанием (рис.2.5) представляет собой необходимую для обработки данной заготовки на станке регулируемую совокупность инструментов, приспособлений, технологической среды, с одной стороны, и процесса резания – с другой. Процесс резания характеризуется большим числом параметров. В общем случае любой из них может быть регулируемым.

Регулирование процесса обработки заключается в том, чтобы, исходя из наличия первичных параметров, характеризующих выбранный тип заготовки (материал, размер, припуск и т.д.) и принятого метода обработки (станок, приспособление, схема резания, технологическая среда), изменяя управляемые параметры (режимы резания, вариант и геометрические параметры инструмента, параметры и структура несущей системы станка), воздействовать на параметры регулирования (механика процесса резания, наростообразование, стружкодробление, тепловые явления, сила и мощность резания, вибрации) и добиться получения необходимых технологических параметров (точность,

качество поверхности, стойкость инструмента, прочность инструмента, производительность, экономичность, форма стружки).

При осуществлении автоматического цикла работы тяжелого оборудования, задачи управления являются многоуровневыми и многофакторными.



Рис.2.5. Схема регулирования процесса обработки на тяжелых станках

2.4 Методика стойкостных эксплуатационных испытаний процессов обработки на тяжелых токарных станках

Эксплуатационные испытания проводились на тяжелых токарных станках моделей КЖ16274Ф3, 1А670Ф3 применяемые в механических цехах №3 и №5 ПАО НКМЗ.

Технические характеристики станков приведены в табл. 2.10.

Табл.2.10. Технические характеристики тяжелого токарного станка мод. КЖ16274Ф3

Наименование характеристики	Значение
Размеры обрабатываемой детали, мм	
Наибольший диаметр	1000
над суппортом	1300
Количество резцедержателей, шт.	2
Перемещение органов суппорта, мм	
салазок (ось X)	650
каретки (ось Z)	5940
Наибольшее перемещение задней бабки, мм	5625
Частоты оборотов шпинделя, об/мин.	2–450
Мощность привода главного движения, кВт	110
Габариты – 14872 х 4880 х 2550 (мм)	
Масса станка – 54000 кг	

Характеристики станков и материалов, которые применялись для исследования прочности режущей части резцов приведены в таблицах 2.11-2.13.

Табл. 2.11. Характеристики станков, на которых проводились исследования прочности режущей части резцов

D_{max} , мм	L , мм	Q , т	$s_{min}-s_{max}$ мм/об.	$n_{min}-$ n_{max} , об./мин.	P_{max} , Н	$M_{кр}$, кНм	N , кВт	j , Н/мм
1600	5000	25	0,4-2,5	1,8-80	60500	218,2	44	-
1560	5000	21	0,4-2,5	1,5-60,5	70000	303	44	-
1650	10000	50	0,2-88	2-128	31800	714	100	48000
1980	10000	50	0,2-19	2-128	31800	714	100	46000
1755	15900	25	0,2-5,0	0,695-74	32000	651	40	25000
2340	31500	122	0,32- 9,55	0,64-38	39200	315	105	-
2440	25000	80	0,12-48	0,45-5,6	35000	3460	115	-

Табл.2.12. Характеристики материалов, при обработке которых проводились исследования прочности режущей части резцов

Марка обработ. материала	Химический состав в процентах (ГОСТ 1050-72)								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	S	P
								Не больше	
40X	0,35-0,45	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	0,4			0,045	0,04
55X	0,5-0,6	0,5-0,2	0,17-0,37	1,0-1,3	0,5			0,04	0,04
50XH	0,45-0,55	0,5-0,8	0,17-0,37	0,45- 0,75	1,0- 1,5			0,04	0,04
45XHM	0,3-0,4	0,5-0,8	0,17-0,37	1,3-1,7	1,3- 1,7		0,2- 0,3	0,35	0,03
90XΦ	0,85-0,95	0,2-0,35	0,25-0,45	1,4-1,7	0,3	0,1- 0,2		0,04	0,04
3X13	0,25-0,34	0,6	0,6	12-14	0,6			0,03	0,035

Табл. 2.13. Механические свойства материалов деталей

Марка обработ. материала	Механические свойства (ГОСТ 2835-52)				
	Граница текучести, Н/мм ²	Граница прочности на рас-тяж., Н/мм ²	Относит. удлинение, $\delta_s\%$	Относит. сужение, $\psi\%$	Ударная вязкость, Н·м/см ²
40X	400	600	17	35	60
55X	350	650	10	30	—
40XH	300–350	650–700	18–20	45–50	—
90XФ	690	950	1,2	1,0	6

Испытания проводились на станках с $D_{\max} = 1250-2500$ мм с высотой резца от 40 до 80 мм. Исследованы режущие пластины одной партии из твердых сплавов, которые рекомендованы для обработки на тяжелых станках, основные их характеристики приведены в таблице 2.14.

Табл. 2.14. Механические свойства твердых сплавов, применяемых при обработке на тяжелых токарных станках

Марка твердого сплава	Физико-механические свойства		
	Предел прочности при изгибе, МПа	Удельный вес, г/см ³	Твердость, HRA не меньше
T5K10	1469	12,72	90
TT7K12	1550	13,0	87
BK8	1650	14,8	88

Геометрические параметры режущей части резцов для всех испытаний принимались согласно нормам завода. Испытания проводились при глубине резания 5-30 мм со скоростью резания примерно соответствующей 0,25-2,0 от экономической скорости для данных условий.

В рамках одной серии испытаний оставались неизменными станок, заготовка, партия резцов и партия твердосплавных пластин. Тщательно проверялась величина разрушающей подачи для одного значения аргумента

общего с ранее проведенными испытаниями с целью возможности приведения результатов опытов к постоянным условиям.

Исследовалось влияние на разрушающую подачу следующих факторов: размеры и состояние станка, материала заготовки, наличия корки и ударов, инструментального материала, конструкции и технологии изготовления резцов, глубины резания, скорости резания и износа резца. При испытаниях наряду с условиями работы и значением разрушающей подачи регистрировалась величина и характер поломки режущей части резцов. Наиболее типичные поломки фотографировались.

Каждый эксперимент по определению разрушающей подачи повторялся не менее трех раз. Кроме установления разрушающей подачи при кратковременных испытаниях проверялась ее связь с временем работы, а также влияние подачи на вероятность поломок.

2.5 Методика проектирования мехатронных станочных систем

Возможность современных систем ЧПУ позволяет использовать пре- и постпроцессоры, а также информацию от измерительных преобразователей, фиксирующих параметры процесса обработки (температуру, силы, крутящие моменты, вибрации и др.). С помощью этих средств в процессе обработки динамически корректируется изначальная программа ЧПУ с режимными параметрами и геометрией инструмента. Оптимальное адаптивное регулирование базируется на полной динамической исходной модели процесса резания. Оптимизация осуществляется во время всего процесса обработки и гарантирует оптимальное проведение процесса резания. Постоянное определение мгновенного положения оптимальной рабочей точки в соответствии с мгновенным состоянием процесса резания осуществляется постоянным сравнением актуальных значений характерных величин параметров.

Предлагаемая методика проектирования мехатронных станочных систем состоит из шестнадцати этапов (рис.2.6).

1. Техническое задание на машину. Этот этап подразумевает формулирование функционального назначения и основных эксплуатационных параметров проектируемой машины и выполняется заказчиком, но активное участие в этом процессе специалистов которые будут проектировать эту машину всегда уместно и часто позволяет сформулировать техническое задание оптимальным образом.

2. Выбор метода формообразования, разработка технологии обработки изделия на проектируемом станке, эскизов технологических наладок и цикла работы станка. Данный этап ничем не отличается от аналогичного этапа традиционной методики проектирования [89, 90, 91] и не требует от механика дополнительных знаний, однако с учетом возможностей мехатронных систем набор приемлемых методов формообразования, как правило, расширяется и выбор может быть более рациональным. На последующих этапах проектирования возможен пересмотр выбранного метода.

3. Разработка кинематики движений рабочих органов станка. Этот этап присутствует и в традиционной методике проектирования, но для мехатронных систем имеет особенность. Если технология обработки изделия требует сложных движений рабочих органов станка, то в традиционной методике это достигалось введением внутренних кинематических связей, причем передаточная функция этих связей могла быть только линейной. Создание нелинейных передач ограничивалось гармоническими функциями, реализуемыми с помощью кривошипных механизмов, а также некоторым объемом произвольных функций, реализуемых с помощью кулачковых механизмов, которые, впрочем, имеют известный ряд существенных ограничений, как по приемлемой величине хода, так и по предельным соотношениям скоростей согласуемых движений.

При новом подходе необходимо руководствоваться принципом: на каждое простое движение необходим собственный привод, а все согласования этих движений следует реализовывать электронными и программными средствами. Кроме того, конструктор должен иметь в виду, что применение

программных средств позволяет реализовать практически любые линейные и нелинейные передаточные функции, а также функции заданные табличным и алгоритмическим способом. Причем параметры этих функций и сами функции могут оперативно изменяться, как оператором при наладке станка, так и в процессе работы станка по различным сигналам адаптивного управления, если это требуется. При разработке передаточные функции внутренних кинематических связей должны быть сформулированы соответственно в виде уравнений, таблиц, алгоритмов или их комбинаций. В дальнейшем проектировании они будут представлять собой важную часть исходных данных для разработки электронной части машины и программного обеспечения.

4. Оценка параметров движений и предварительный выбор типов приводов. Под оценкой параметров движения понимается анализ значений и пределов изменения для каждого простого движения в отдельности таких параметров, как сила или крутящий момент, пределы перемещения, скорость, ускорение, наличие реверса, требуемая точность и дискретность, и сопоставление этих параметров с соответствующими параметрами доступных типов приводов. На данном этапе конструктору потребуются расширенные знания в области электро-, гидро- и пневмопривода, и здесь целесообразно привлечение специалистов в соответствующих областях.

5. Сортировка параметров движения на программно управляемые, автоматически или адаптивно регулируемые и не требующие регулирования. Под программным управлением понимается изменение значения параметра по заранее введенной программе. Автоматическое регулирование – это изменение значения параметра по определенному закону в зависимости от значений других параметров. А если при автоматическом регулировании определенные параметры влияют еще и на закон регулирования, то получаем адаптивное управление. Аналогичные действия выполнялись и в традиционной методике проектирования, однако автоматическое и адаптивное управление при этом практически не применялось ввиду значительной сложности или

невозможности реализации такого управления механическими или электромеханическими средствами.

Применение же электронных и вычислительных средств открывает широкие возможности для применения этих принципов управления. Примерами таких применений могут служить системы управления давлением в гидростатических направляющих в зависимости от толщины рабочего зазора или от приложенной нагрузки, управление скоростью или усилием подачи в зависимости от сил резания, управление скоростью резания в зависимости от температуры режущего инструмента, управление сменой инструмента на основании диагностики его состояния по силам резания и т. п. [2]. Здесь также следует упомянуть и повсеместно применяемый случай автоматического управления. Любой привод подачи станка с ЧПУ (кроме шагового) обязательно содержит два или три контура автоматического регулирования: по положению, по скорости и по току. Данная сортировка требуется, во-первых, для выявления возможности и/или необходимости применения контуров автоматического регулирования и закладки в конструкцию системы требуемого их количества, а во-вторых для составления технического задания на разработку устройства программного управления.

6. Следующим этапом, присущим только для проектирования мехатронных систем, является оценка требуемой точности и динамики изменения всех управляемых и контролируемых параметров, а также предварительный выбор способа их представления и передачи. Не смотря на явное отношение этого вопроса к специалистам в области электроники и вычислительной техники, данную задачу должен решать главным образом механик, поскольку большинство из рассматриваемых параметров являются параметрами движений, и только специалист в области станкостроения может адекватно их учесть и оценить. Но сказанное никоим образом не исключает участия в этом процессе вышеупомянутых специалистов.

Результатом данного этапа должен быть список управляемых параметров с указанием способа представления (дискретный, цифровой, аналоговый),

необходимой точности для аналоговых или разрядности для цифровых способов представления, диапазона возможных значений каждого параметра и максимально возможной скорости их изменения. По этим данным на этом же этапе уже может быть выполнен предварительный выбор типов датчиков для измерения контролируемых параметров для обратных связей и для диагностики.

7. Разработка функциональной схемы системы управления и машины в целом. Под функциональной схемой понимается упрощенное представление кинематики станка с изображением всех приводов, датчиков, узлов системы управления с детализацией, достаточной для подробной передачи принципа ее действия, и всех информационных связей с указанием типа сигнала и направлением его передачи. Этот этап можно считать наиболее ответственным и сложным. От продуманности функциональной схемы зависит эффективность и трудоемкость разработки электронной и программной части машины, ее конечная сложность, стоимость и надежность. Если проанализировать состав областей знаний, необходимых для выполнения этого этапа, то оказывается, что его выполнение не под силу ни одному из специалистов классической подготовки вышеупомянутых направлений без помощи специалистов смежных областей, и здесь совместная творческая работа специалистов трех направлений просто необходима. Но большей эффективности можно ожидать, если все тот же механик владеет хотя бы общими знаниями в смежных областях. При этом, что касается программной части, то только теоретических знаний здесь недостаточно. Необходим практический опыт разработки алгоритмов, поскольку это та область знаний, которую крайне сложно формализовать.

8. Анализ характеристик информационных потоков и вычислительных процессов. Данный этап выполняется специалистами в области электротехники, электроники, программирования и если необходимо других направлений, без обязательного участия механика. Цель его выполнения – на основании результатов ранее выполненных этапов оценить возможность и

эффективность реализации машины согласно разработанной функциональной схеме, и в случае обнаружения ошибок и нерациональных решений вернуться к предыдущим этапам с соответствующими коррективами. В определенных случаях имеет смысл провести сравнительный анализ нескольких вариантов проекта.

При выполнении данного этапа необходимо дать ответы на следующие вопросы:

- Рационально ли выбраны типы двигателей?
- Рационально ли выбраны типы датчиков?
- Какова экономическая целесообразность применения именно этих типов и возможны ли другие варианты?
- Какова будет сложность алгоритма работы системы управления и программного обеспечения в соответствии с разработанной технологией, кинематикой, математическими моделями кинематических связей и требованиями по точности и быстродействию?
- Какие аппаратные средства понадобятся для реализации системы управления?
- Каким должен быть интерфейс оператора?
- Какова экономическая целесообразность применения таких аппаратных средств, и какие возможны изменения в проекте с целью снижения стоимости и повышения надежности электромеханической и аппаратной части без ущерба для остальных характеристик?
- Какие возможны изменения в проекте с целью упрощения программной части, снижения трудоемкости ее разработки, снижения вероятности сбоев без ущерба для остальных характеристик?

9. Разработка перечня параметров подлежащих контролю и перечня реакций на изменения этих параметров. Мехатронный станок в подавляющем большинстве случаев проектируется под автоматический или полуавтоматический режим работы. Для надежной работы в этих режимах, исключения несчастных случаев и повреждений оборудования станок

обязательно должен иметь систему блокировок и самодиагностики. Собственно сама эта система разрабатывается электронщиками и программистами. Задача механика на этом этапе – сформировать исчерпывающий перечень контрольных параметров и их комбинаций, а также перечень реакций системы на их изменения, что позволит с максимально возможной надежностью избежать аварийных и опасных для персонала ситуаций.

10. Техническое задание на разработку схемы электрической принципиальной. Это формальный этап, на котором из информации, полученной на предыдущих этапах, выбираются исходные данные для разработки электрической и электронной частей станка. К ним относятся: Функциональная схема, типы двигателей и их основные характеристики, типы датчиков и их основные характеристики, требования по точности и динамике ко всем сигналам (управляемым параметрам), задействованным в электрической части, требования к интерфейсу оператора. После проработки технического задания соответствующим специалистом возможно очередное внесение корректив в результаты предыдущих этапов.

11. Разработка укрупненного алгоритма работы системы управления. Укрупненный или упрощенный алгоритм работы системы управления является основой технического задания на разработку программного обеспечения. Его разработку рекомендуется выполнять в несколько этапов. За основу берется ранее разработанная технология обработки изделия, цикл работы станка и кинематика рабочих движений. Они изображаются в виде блок-схемы алгоритма. Затем эта блок-схема постепенно детализируется с учетом принципов работы отдельных подсистем узлов и элементов. Для эффективного выполнения этого этапа первые приближения должен выполнять механик, и для этого ему необходимо достаточно отчетливо представлять принципы работы и возможности тех микропроцессорных средств, на базе которых предполагается строить систему управления, а также ориентироваться в электрической и электронной частях станка. При отсутствии этих знаний

данный этап должен выполняться в тандеме с программистом и электронщиком, но основу алгоритма так или иначе должен дать механик.

12. Техническое задание на разработку программного обеспечения составляется из разработанной блок-схема алгоритма работы системы управления, количественных характеристик всех параметров, задействованных в программной части станка, а также требований к интерфейсу оператора и, если необходимо, требований к внешним каналам связи.

13. Уточнение параметров и структуры машины после разработки программного обеспечения. В процессе разработки программного обеспечения некоторые задачи, заложенные в алгоритме, могут оказаться нереализуемыми на выбранных аппаратных средствах, что потребует пересмотра предыдущих технических решений или выбору других аппаратных средств. Либо наоборот, программист может выявить более рациональные программно-аппаратные решения, что потребует пересмотра предыдущих технических решений.

14. Разработка технического проекта является формальным этапом разработки и представляет собой оформительскую работу по результатам предыдущих этапов. Состав технического проекта ничем не отличается от традиционного подхода и в описании не нуждается.

15. Макетирование машины и системы управления. Этот этап является обязательным при конструировании машин высокой сложности, а для машин средней сложности – весьма желательным. Кроме того, для электронной и электрической частей макетирование желательно даже для машин низкой сложности, а для сложных – обязательно. Цель макетирования – при минимальных затратах обеспечить полноценную проверку работоспособности и отсутствия ошибок в электронной части, а также возможность отладки программного обеспечения на «живом» объекте управления.

Как показывает практический опыт подавляющего большинства программистов, даже несложные программы практически всегда требуют поиска ошибок и отладки, и в особенности это относится к программному обеспечению для микроконтроллеров. Не смотря на наличие большого

разнообразия программных симуляторов для микропроцессорных средств, только наличие действующего макета системы управления в совокупности со средствами внутрисхемной отладки дает полноценные возможности для проверки и отладки программного обеспечения. Следует отметить, что необходимость точного макетирования механической части возникает крайне редко, и в основном для сложных машин. Кроме того, затраты на макетирование механической части, как правило на порядок превышают затраты на макет системы управления. В большинстве случаев достаточно создания упрощенного макета механики, который бы выполнял все движения проектируемой машины и давал возможность получить все требуемые сигналы обратных связей. При этом, в целях снижения затрат на макетирование, многие дискретные исполнительные органы, такие как гидроцилиндры, нерегулируемые электродвигатели и т. п., не воздействующие на датчики обратной связи могут быть заменены световыми индикаторами без ущерба для эффективности отладки программного обеспечения и проверки работоспособности машины.

16. Разработка рабочего проекта машины, как и разработка технического проекта, полностью совпадает с традиционным подходом и выполняется в соответствии с требованиями и стандартами предприятия-изготовителя.

Выводы по разделу 2

1. Разработанные методики позволяют осуществлять теоретические, статистические и экспериментальные исследования процесса обработки деталей на тяжелых токарных станках.

2. Методика статистических исследований предприятий тяжелого машиностроения предполагает на базе созданной базы знаний с использованием методов математической статистики осуществлять группирование данных по заданному признаку, определять параметры законов распределения, производить регрессионный и корреляционный анализ данных,

выявлять требуемые параметры оборудования, оптимизировать режимы резания.

3. Методика проектирования тяжелых токарных станков основана на разработке комплексной информационной модели представителя с использованием функционально – стоимостного анализа.

4. Выходные параметры процесса резания могут быть критериями оптимизации управляющих параметров. Рассматривая режущий инструмент как неотъемлемую часть процесса резания, можно считать, что условиями его эксплуатации, связанными с процессом обработки деталей, является как управляемые, так и возбуждающие параметры, существенно влияющие на работоспособность инструмента.

5. Регулирование процесса обработки заключается в том, чтобы, исходя из наличия первичных параметров, характеризующих выбранный тип заготовки и принятого метода обработки, изменяя управляемые параметры, воздействовать на параметры регулирования и добиться получения необходимых технологических параметров. При осуществлении автоматического цикла работы тяжелого оборудования задачи управления являются многоуровневыми и многофакторными.

6. Экспериментальные исследования зависимости подачи и вероятности разрушения инструментов от условий эксплуатации производились в соответствии с методикой исследований методом ступенчато-возрастающих подач.

7. Разработана методика проектирования мехатронных станочных систем, позволяющая реализовать модели оптимального управления процессом резания на тяжелых станках

3 ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ О МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

3.1 Анализ условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения

В основу методики был положен статистический анализ данных по надежности и условиям эксплуатации станков с охватом около 100 заводов и 439 единиц станков. Сбор материалов для анализа проводился двумя способами.

Первый способ состоял в наблюдениях за работой станков и опросе заводских работников (слесарей, токарей, механиков, мастеров, технологов, главных специалистов). Опрос учитывал сведения об отказах станков, предложения по улучшению конструкции, по дополнительному оснащению и по требуемому уровню параметров. Данные по применяемым режимам резания и технологическим переходам регистрировались методом моментных наблюдений. Сила резания, крутящий момент и мощность резания определялись расчетом по нормативам.

Второй способ сбора сведений заключался в письменных запросах с применением рассылаемых на заводы опросных листов. Запросы были разосланы на 200 заводов. Ответы были получены с 57 заводов. При анализе эти данные были обобщены совместно с зарегистрированными на заводе.

При статистической обработке сведений был дополнен банк данных о работе тяжелых станков [148, 152].

Анализ деталей и рекомендуемые параметры черновых станков приведен в табл. 3.1. Распределение деталей банка данных по назначению показано на рис. 3.1.

Табл. 3.1. Анализ деталей и рекомендуемые параметры черновых станков

D _{max}	Распределение деталей, %								Рекомендуемые параметры	
	Длина деталей, мм				Вес деталей, т					
	До 6000	6000- 80000	8000- 10000	10000- 15000	До 25	25- 40	40- 63	63- 100	L _{max}	Q _{max}
1250	26	1.2	4	-	31	-	-	-	6300- 10000	25
1600	24	18.7	6	0.8	19	23	4.5	-	6000	50
									10000	40
2000	8.5	7.5	3.5	0.8	10	4	4	0.5	6000	25
									10000	68
2500	4.2	-	-	-	4	-	-	-	-	-

База знаний (БЗ) – это система организации, ведения и хранения интегрированной информации, расположенной на машинных носителях и предназначенной для комплексного многоцелевого использования, вместе со специальными программами, организационными и техническими средствами его ведения.

Основные составные элементы БЗ – база данных и система управления базой данных. База данных представляет собой взаимосвязанную совокупность данных определённым образом организованных и хранимых на магнитных дисках и в нашем случае используемых в качестве информации для решения задач определения рациональных режимов резания, норм стойкости и расхода инструмента.

Структура базы данных отражена в протоколах эксплуатационных наблюдений, содержащих параметры, характеризующие процесс механической обработки.

База знаний обеспечивает быстрый доступ к каждому элементу информации. Это требование учитывалось при разработке структуры базы знаний.



Рис. 3.1. Распределение деталей базы данных по назначению

Для этого в ней отражены естественные логические связи между данными, на основании которых при решении задач выполнялась выборка нужных элементов информации без обработки остальной информации. В базе знаний отсутствует избыточная информация, т.е. значение каждого реквизита (например, номера детали, кода материала детали) запоминается в базе знаний только один раз, а поиск нужных данных (например, применяемость данного обрабатываемого материала) по соответствующему реквизиту осуществляется с помощью адресных ссылок к месту её расположения в банке данных. Различные данные согласованы между собой. Добавление в базу знаний новых единиц информации и обновление информации производится таким образом, что эти изменения не противоречат состоянию ранее накопленных данных.

Структура базы знаний представлена на рис. 3.2.

Анализ БЗ по геометрической форме деталей показал, что широко применяются детали типа тел вращения. Они были выделены и проанализированы.

По степени влияния факторов на выходные параметры были определены существенные факторы и проранжированы в ряд. Наиболее сильным из них по влиянию на подачу и скорость резания оказался основной размерный параметр станка – наибольший диаметр обрабатываемой детали над станиной Дс. Поэтому группирование элементов базы данных производилось по данному признаку. Внутри каждой группы исследовалось распределение всех параметров детали, элементов, режима резания, мощности, сил резания.

Основным методом обработки заготовок деталей типа тел вращения (рис. 3.3) является механическая обработка резанием. При этом, как правило, с заготовок снимают достаточно большие припуски, что приводит к высоким материальным затратам.

По-прежнему, слабо внедряются перспективные технологические процессы литья, штамповки, фрезоточение, электрофизикохимические методы обработки.



Рис. 3.3. Деталь-представитель тяжелого машиностроения

Анализ данных по назначению обрабатываемых деталей типа тел вращения показал, что большим спросом в современном тяжелом машиностроении пользуются валки опорные и валки рабочие холодной и горячей прокатки, гребные валы и валы роторов ветрогенераторов.

Распределение деталей в базе знаний по характеристикам, назначению и объёму выпуска представлено в таблице 3.2.

Табл. 3.2. Распределение деталей БЗ по назначению

Характеристика деталей	Номенклатура
Валки опорные горячей прокатки	39
Валки рабочие горячей прокатки	11
Валки опорные холодной прокатки	18
Кузнечно-прессовое оборудование	1,5
Гидротехническое оборудование	1
Энергетическое оборудование	26
Запчасти металлургического оборудования	1,2
Запчасти кузнечно-прессового оборудования	0,3
Поковки с предварительной мех. обработкой	2

Таким образом, статистический анализ БЗ показал возможность группирования деталей по наиболее характерным признакам (геометрическая форма, габаритные размеры, материал заготовки, точность и др.) и выработки на этой основе рекомендаций по выбору металлургического оборудования с программным управлением, потребительские свойства которого отвечали бы технологическим задачам, решаемым на большинстве производств серийного типа.

На рисунке 3.4 представлены наиболее применяемые диаметры заготовок при обработке на тяжелых станках.

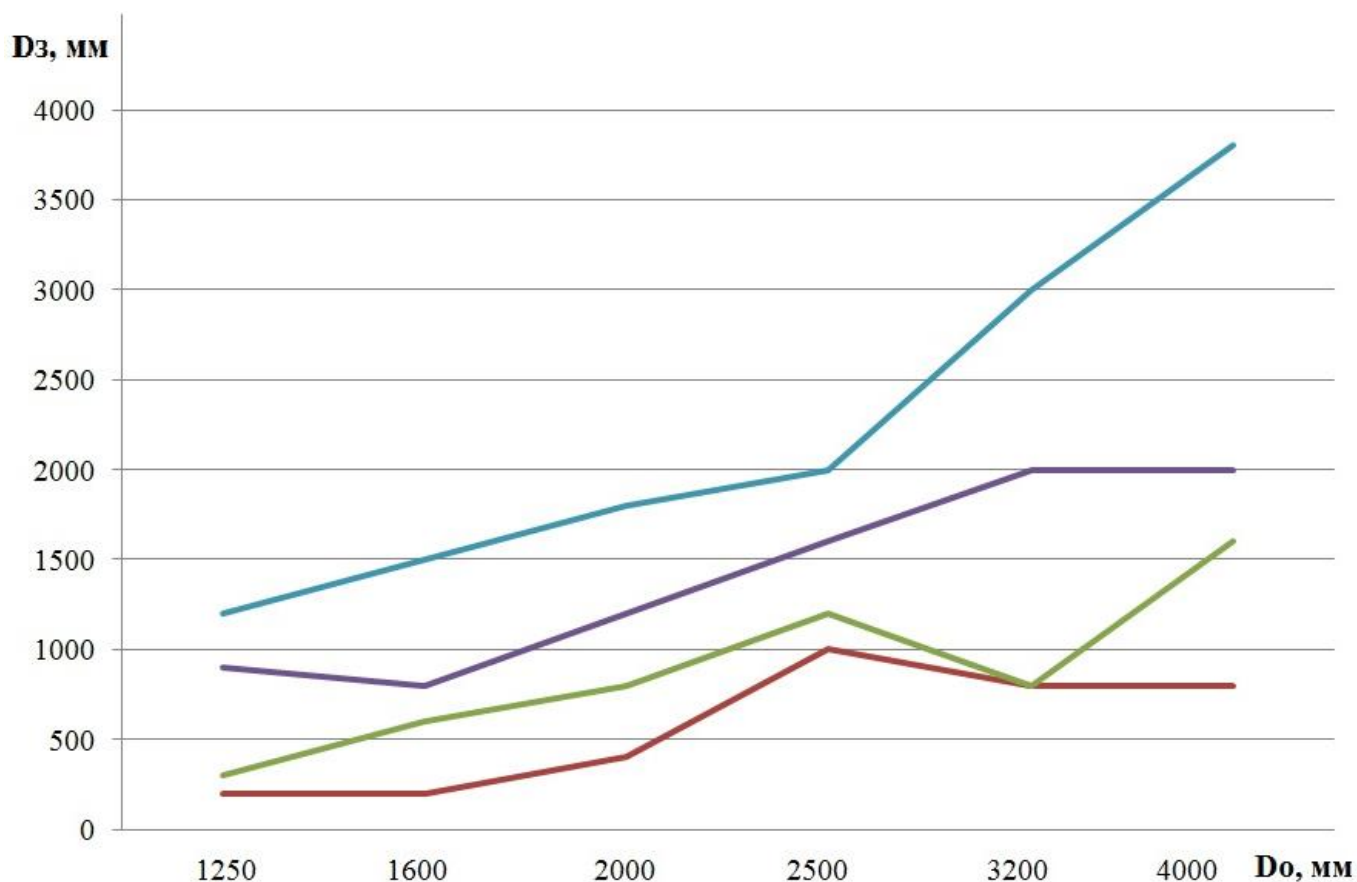


Рис. 3.4. Предельные и наиболее применяемые диаметры заготовок на тяжелых токарных станках

Учитывая, что формирование БЗ о деталях производилось многие годы, исследована его адекватность современным условиям механообработки на предприятиях г. Краматорска.

Данная задача решалась путем кодирования 600 деталей, входящих в изделия, освоенные в производстве после 2005 года на трех предприятиях г. Краматорска (КЗТС, НКМЗ, ЭМСС). Выполнено сравнение распределений различных характеристик вновь закодированных деталей с распределениями деталей БЗ.

Анализ формы обрабатываемых поверхностей деталей выборки 2015 года показал, что относительные распределения форм практически полностью соответствует распределению деталей в БЗ. Установлено, что в выборке так же доминируют цилиндрические гладкие и ступенчатые поверхности.

Высокое подобие установлено по материалам обрабатываемых заготовок в выборке 2015 года и в БЗ. Анализ распределения деталей выборки показал, что наиболее часто заготовки изготавливают из конструкционных и легированных сталей.

Таким образом, установлено высокое подобие распределений деталей по всем вышеупомянутым параметрам выборки 2015 года и БЗ, созданной в 2005 году. Такой вывод позволяет считать справедливым использование БЗ в качестве информационной базы для исследований по выбору тяжелого токарного оборудования с числовым программным управлением.

3.2 Формирование групп деталей типа тел вращения в зависимости от их сложности

Создание рационального тяжелого станка с ЧПУ во многом зависит от качества решения задач на этапе его технологического проектирования, когда определяются технологические возможности и основные параметры машин. Очевидно, что параметры оборудования целесообразно формировать в зависимости от характеристик, подлежащих обработке на нем деталей. В условиях многономенклатурного производства технологической основой проектирования станков с ЧПУ может быть только группа правильно подобранных деталей. Поэтому, необходимо разработать и на практике проверить признаки и критерии подбора деталей в группы.

Процесс формирования групп деталей, которые целесообразно принять в качестве основы для создания станков с ЧПУ, можно представить в виде следующей последовательности [38, 39, 42, 43]:

- обоснование информационной модели детали;
- формирование представительной базы знаний о деталях;

- объединение деталей в конструкторско-технологические группы;
- выбор групп деталей, которые экономически целесообразно обрабатывать на тяжелых станках с ЧПУ и разработка комплексных деталей-представителей.

Информационная модель детали является основной структурной единицей базы знаний о деталях, позволяющая описать на информационном языке необходимые конструктивно-технологические и организационно-плановые характеристики детали. Формализацию характеристик деталей осуществляют, как правило, с помощью различных классификационных систем, которые представляют собой систематизированный свод наименований объектов классификации, классификационных группировок и их кодовых обозначений.

При классификации характеристики объектов производства формализуются посредством соответствующих классификационных признаков в кодовые числа и (или) буквы, что позволяет перейти на единое обезличенное обозначение всех элементов базы данных (вне зависимости от их функционального назначения), систематизировать сведения о характеристиках деталей путем отнесения их к той или иной классификационной группировке и сделать ИМД более компактной и удобной для обработки на ЭВМ.

Рассмотрим общую схему конструкторско-технологической классификации детали и представления сведений о ней в ИМД. Каждая деталь D может быть охарактеризована и соответственно описана некоторой совокупностью (множеством) признаков:

$$D = \{ P_1, \dots, P_i, \dots, P_n \}, \quad (3.1)$$

где P_i – i -й признак детали; n – общее количество признаков.

Каждый из n признаков в свою очередь может быть представлен двумя частями: наименованием признака X_i и его числовым значением x_i . При кодировании какого-либо объекта по определенному признаку используют

соответствующую ему классификационную систему (таблицу), примерами которой могут служить конструкторские и технологические классификаторы [43, 51, 116].

При формировании информационной модели детали требуется решить задачу создания оптимального набора классификационных признаков, являющихся наиболее информативными для создания оборудования с ЧПУ. Эта задача относится к классу задач, связанных с оценкой необходимости некоторой совокупности признаков [43, 87], и фактически сводится к проблеме выделения (отбора) этих признаков, так как всегда целесообразно сокращение их числа.

Данную задачу целесообразно решить путем наложения множества $Y = (y_1, \dots, y_i)$ параметров тяжелого станка с ЧПУ, оцениваемых при его выборе (например, количество формообразующих координатных перемещений исполнительных органов станка, степень концентрации операций, размер рабочего пространства, класс точности, тип системы ЧПУ и ряд др.) на множество классификационных признаков $X = (x_1, \dots, x_i)$. Наложение множества Y на множество X математически можно представить с помощью отображения множеств [43].

Пусть имеем многозначное отображение v множества B параметров станка с ПУ во множество A классификационных признаков:

$$v: B \rightarrow A. \quad (3.2)$$

При отображении v каждому элементу b_i множества B сопоставляется один или несколько элементов A множества A , которое в той или иной степени влияют на b_i

Тогда, образом $v(b_i)$ каждого параметра станка с ПУ $b_i \in B$ по подмножеству A будет подмножество классификационных признаков, сопоставляемых при отображении v элементу b_i :

$$v(b_i) = \{ A_i \} \in A, \quad (3.3)$$

где $\{ a_i \}$ - подмножество классификационных признаков, определяющих y_i (или являющихся наиболее информативными для y_i).

В свою очередь, объединив образы всех параметров станка $(b_1, \dots, b_i) \in B$ по отображению v , получим искомый набор классификационных признаков, являющихся наиболее информативными для создания тяжелых станков с ЧПУ:

$$U_{n \in N} v(b_i) = \{ a_i / \exists n (n \in N) \wedge a_i \in v(b_i) \}, \quad (3.4)$$

где N – множество образов элементов $(b_1, \dots, b_i) \in B$ при отображении v ;

n - элементы множества N .

Область значений отображения v или, другими словами, общий набор классификационных признаков A определим следующим образом:

$$A = \{ (U_{n \in N} v(b_i) \in A) \} \subset A_{\text{кл}}. \quad (3.5)$$

Критерием сопоставления i -того классификационного признака i -тому параметру станка при отображении v является степень его влияния (значимости) на i -й параметр тяжелого станка с ЧПУ. Задача выявления наиболее информативных классификационных признаков для конструкторской и технологической подготовки производства решена при создании регионального банка данных о деталях, изготавливаемых на предприятиях Донецкой области.

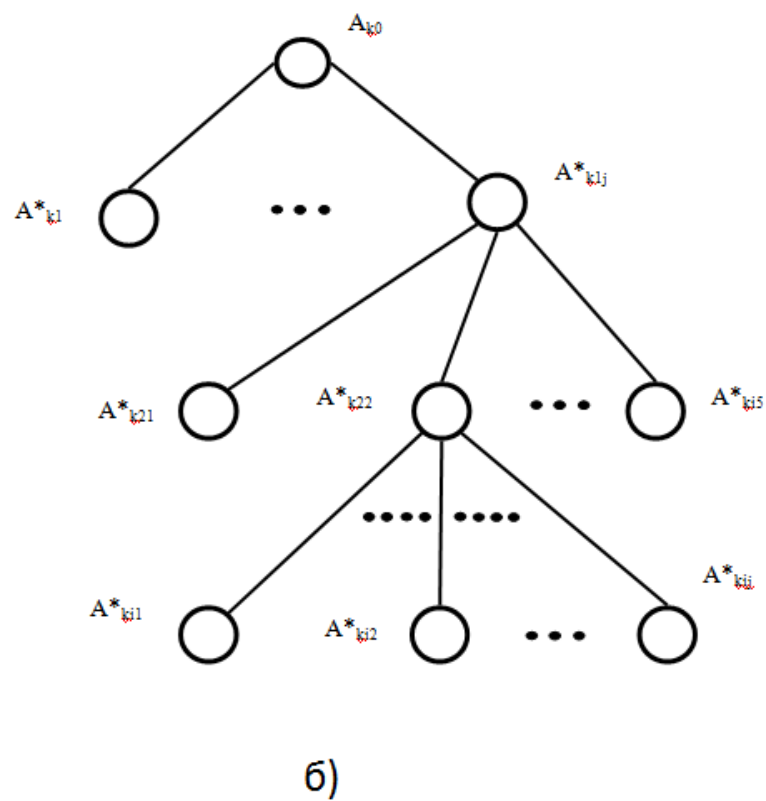
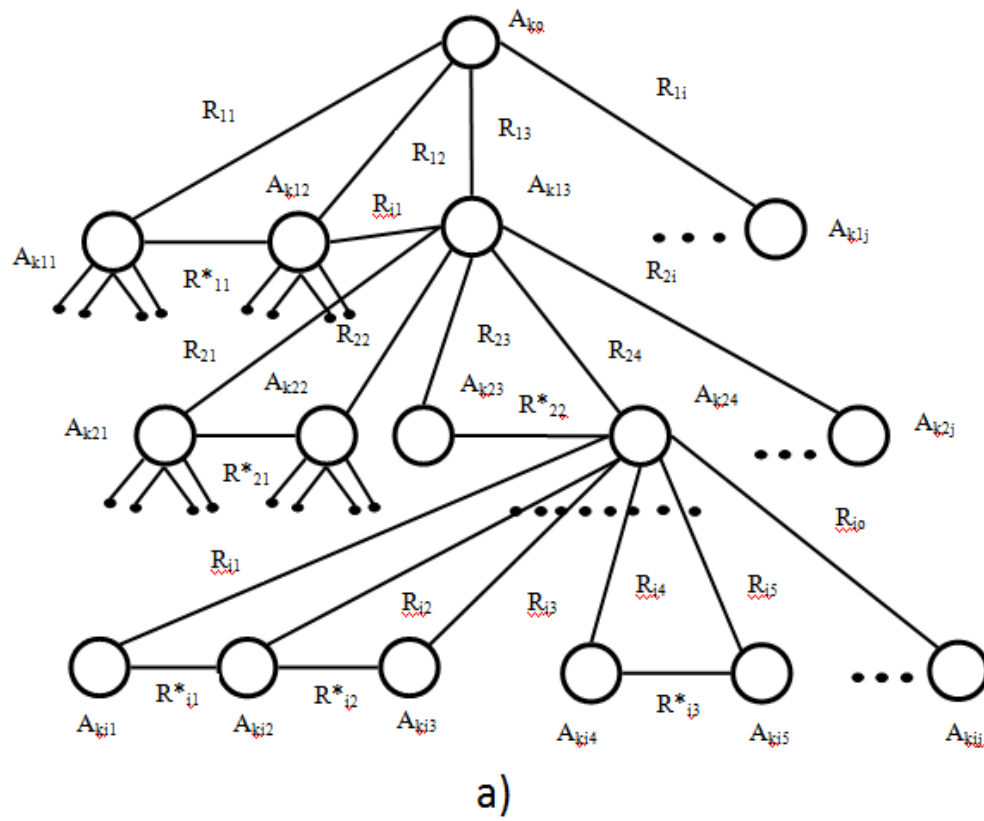
Иерархическую структуру конструкторского классификатора можно представить в виде графа-дерева $L_g = (A_k, R)$, где A_k - множество вершин графа (или, в данном случае, множество конструкторских признаков) и R – множество ребер, показывающих взаимосвязь признаков-вершин (рис. 3.5, а).

Каждая классификационная группировка A_{ki} имеет свою область значений классификационных признаков: $A_{ko} = \{ a_{ko} \}$; $A_{k1} = \{ a_{k11}, a_{k12}, \dots, a_{k1j} \}$; $A_{ki} = \{ a_{ki1}, a_{ki2}, \dots, a_{kij} \}$, где $\{ a_{ko}, \dots, a_{kij} \} \in A_k$ – множество значений

классификационных признаков, составляющих области значений наименований конструктивных признаков A_{k0}, \dots, A_{ki} .

Процесс группирования деталей заключается в преобразовании иерархической структуры графа L_g , показанного на рис. 3.5 а, с помощью операции стягивания (свертки) графа [43].

Операция стягивания вершин графа $L_g = (A_k, R)$ превращает его в другой граф L_g с числом вершин $n(L) - 1$ и с меньшим, чем у L_g числом ребер (рис. 3.5, б). Например, при стягивании ребра $r_{21} (a_{k21}, a_{k22}) \in R$ само ребро r_{21} удаляется, а инцидентные ему вершины a_{k21} и a_{k22} заменяются одной a_{k21} . Эта вершина x_{k21} объявляется смежной со всеми теми вершинами множества $A_k \setminus \{a_{k21}, a_{k22}\}$, которые в графе L_g были смежные, по крайней мере, с одной из вершин a_{k21} a_{k22} .



а,б —соответственно до и после стягивания

Рис. 3.5. Граф-дерево признаков деталей классификатора ЕСКД

Практическая реализация операции свертки графа L_g заключается в объединении классификационных признаков a_{kij} для обработки, которых требуется одинаковый состав и число формообразующих координат Φ_k .

В данном случае можно считать, что элементы подмножества A_1 классификационных признаков, полученные в соответствии с уравнением (3.5), вступают в бинарные отношения с элементами множества Φ_k формообразующих координат, которые устанавливают соответствие элементов одного множества элементам другого.

Отношения множеств A_k и Φ_k можно показать с помощью ориентированного графа (рис. 3.5). Вершины графа соответствуют элементам A_k и Φ_k , а дуга, направленная из вершины x_{kij} к f_i означает, что $a_{kij} * f_i$, где a_{kij} и f_i - элементы множеств A_k и Φ_k , а " $*$ " - бинарное отношение, устанавливающее соответствие поверхности (поверхностей) детали, формализуемых определенным классификационным признаком x_{kij} , и требуемых для ее обработки формообразующих перемещений f_i исполнительных органов станка.

Отношения между элементами множеств A_k и Φ_k целесообразно выполнить отдельно по каждой классификационной группировке A_{ki} . В итоге по каждой A_{ki} получим матрицу отношений a_{kij} к f_i : $W_{xk} = || w_{ij} ||_{nm}$, построенных по принципу: 1, если признак i предопределяет выполнение формообразующей координаты j ; 0 в противном случае, где i - номер вершины; j - номера ребер графа; n - число признаков $a_{kij} \in A_{ki}$, m - число формообразующих координат f_i .

Анализ матриц W_{ij} позволяет определить классификационные признаки детали, соответствующие одинаковым формообразующим движениям.

Для классификатора ЕСКД соответствия a_{kij} и f_i можно установить путем выбора типовых схем обработки поверхностей, классифицируемых тем или иным a_{kij} . Соответствие классификационных характеристик деталей A формообразующим координатам Φ_k на первом этапе установим только для основных наружных и внутренних поверхностей, которые в целом определяют

геометрическую форму детали без учета пазов, лысок, шлицев, резьбы, внецентровых (крепежных) отверстий и т.д., часто называемых дополнительными элементами.

Для отбора рациональных групп деталей из 270 групп нужно учесть целевую функцию (или критерий группирования), определяемую условием получения экономического эффекта в производстве. В качестве такого условия примем следующее; полная загрузка в течение года как: минимум одного станка с ЧПУ деталями определенной группы.

Это условие можно выразить целевой функцией:

$$\sum_{i=1}^m P_i \cdot T_{штi} \geq \Phi_{до} \cdot K_3, \quad (3.6)$$

где P_i - годовая программа выпуска i -той детали; $T_{штi}$ - трудоемкость изготовления i -той детали; $\Phi_{до}$ - годовой фонд работы оборудования; K_3 - коэффициент загрузки оборудования; m - число деталей в группе.

На данном этапе каждая из 270 групп деталей проверяется по условию (3.6). Группы деталей, отвечающие этому условию, выделяются в качестве технологической основы для разработки технологических структур тяжелых станков с ЧПУ.

Несмотря на значительное сокращение вершин (признаков) в графе Lg^* , число групп, оставшихся после выделения групп, отвечающих условию (3.6), может быть большим.

На втором этапе группирования целесообразно классификационные признаки X заменить на соответствующие формообразующие координаты Φ_k , которые необходимо реализовать станком для обработки определенного классификационного признака. В качестве второго признака группирования на данном этапе принимает отношение длины к диаметру L/D детали, который во многом определяет технологию ее обработки. Действительно, у деталей типа колец, фланцев ($L < D$) и валов, осей ($L > D$) существенно различаются схемы установки и технологические процессы их изготовления.

При наличии двух основных признаков задача группирования может быть решена методами кластерного анализа [5]. Полученные в результате разбиения множества объектов группы называются кластерами. Методы нахождения кластеров называются кластерным анализом. Таким образом, необходимо решить задачу группирования множества объектов (деталей), каждый из которых характеризуется двумя признаками: Φ_k и L/D . Условное расположение объектов в виде точек на плоскости показано на рис. 3.6. Первым этапом решения задачи поиска кластеров является вычисление расстояний или близости между объектами или признаками.

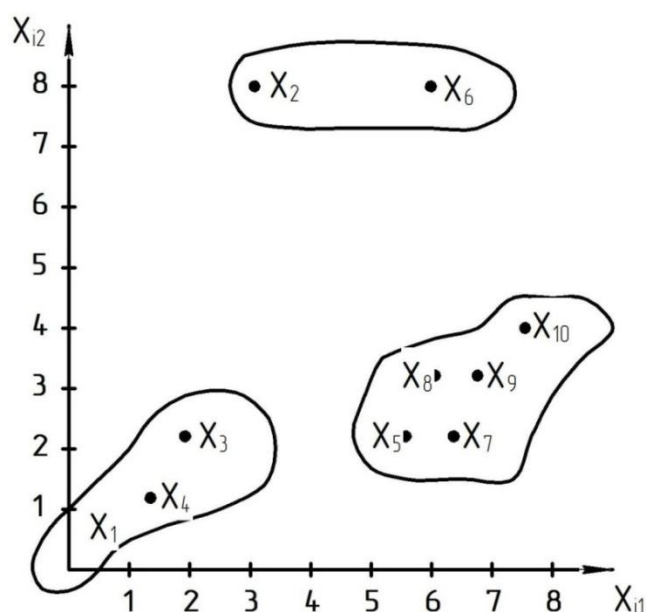


Рис. 3.6. Классификация объектов на плоскости

Воспользуемся агломеративным иерархическим алгоритмом классификации (группирования). В качестве расстояния между объектами возьмем обычное евклидово расстояние, задаваемое формулой:

$$P_E(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_1^k (x_{i1} - x_{j1})^2}, \quad (3.7)$$

где x_{i1}, x_{j1} - величина 1-й компоненты у i -го (j -го) объекта ($i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, n$). На основании расчетов по формуле (3.7) находим расстояния между объектами группирования, и строится матрица расстояний R :

$$R = \{ p(x_i, x_j) \}. \quad (3.8)$$

Из матрицы R выбираются наиболее близкие объекты и объединяются в кластер. После объединения имеем на один кластер (группу деталей) меньше. Расстояние между оставшимися кластерами определим по принципу "ближайшего соседа", воспользовавшись формулой пересчета:

$$P_{l(m,g)} = S_1, S_{(m,g)} = \alpha p_{lm} + \beta p_{lg} + \gamma p_{mg} + \delta [p_{lm} - p_{lg}], \quad (3.9)$$

где $p_{lm} = p(S_1, S_m)$; $p_{lg} = p(S_1, S_g)$; $p_{mg} = p(S_m, S_g)$ – расстояние между классами S_1, S_m, S_g ; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – числовые коэффициенты, значение которых определяет специфику процедуры (принцип "ближайшего или дальнего соседа"), ее алгоритм.

В результате выполнения нескольких шагов объединения кластеров по формулам (3.7), (3.8) и (3.9) можно все группы деталей свести к одной большой группе.

Одновременно с этим, после реализации каждого шага объединения кластеров каждый из вновь полученных кластеров (групп деталей) оценивается по формуле (3.6). Если для данного кластера условие (3.6) выполняется, то он из дальнейшего объединения исключается, а выраженная через него группа деталей может быть использована в качестве технологической основы для создания тяжелых станков с ЧПУ. Если условие (3.6) не выполняется, то данный кластер вместе с остальными участвует на следующем шаге объединения.

В результате анализа деталей, обрабатываемых в условиях ПАО НКМЗ, сформировано три группы деталей на основе кластерного анализа габаритных

размеров и количества требуемых формообразующих движений. Исходные данные и результаты кластерного анализа деталей ПАО НКМЗ представлены в прил. Б.

3.3 Анализ обрабатываемых деталей и использования технологических возможностей станков

Общая задача изучения использования станков разделена на несколько самостоятельных частей. В первую очередь анализировалось использование технологических возможностей станков и технологические требования к ним.

Сведения об обрабатываемых деталях регистрировались в двух формах. Наиболее подробная характеристика деталей содержится в эскизах. Однако заэскизировать все детали, обрабатываемые на обследованных станках, было невозможно. Таким образом, были зафиксированы наиболее типичные детали.

Более полный обзор деталей, хотя и гораздо менее подробный, получили при опросе заводских работников. Кроме того при анализе деталей учитывались сведения, полученные в ответах полученных на письменные запросы, а так же сведения о перспективах проектирования новых машин.

В основу классификации собранных материалов по использованию станков был положен ряд наибольших диаметров точения над станиной D_0 : 1250 мм, 1600 мм, 2000 мм, 2500 мм, 3200 мм, 4000 мм, 5000 мм, 6300 мм.

Для количественной оценки исследуемых параметров станков введены соответствующие коэффициенты.

Коэффициент использования наибольшего диаметра точения над станиной

$$K_{D_0} = \frac{\sum D_i \times R_i}{D_0} \quad (3.10)$$

где: D_i — диаметр обрабатываемой детали; R_i — относительная продолжительность обработки данной детали; D_0 — наибольший диаметр точения над станиной, равный удвоенной высоте центров.

Коэффициент K_{D_0} определён для каждого станка. Диаметр деталей D_i и соответствующая им относительная продолжительность обработки R_i брались по данным опроса. Значение D_0 станка содержится в паспорте.

Аналогично определялись три других коэффициента.

Коэффициент использования наибольшего диаметра точения над суппортом:

$$K_{D_c} = \frac{\sum D_i \times R_i}{D_c} \quad (3.11)$$

Коэффициент использования длины станка:

$$K_{L_0} = \frac{\sum L_i \times R_i}{L_0} \quad (3.12)$$

Коэффициент использования наибольшего веса детали:

$$K_{a_0} = \frac{\sum V_i \times R_i}{V_0} \quad (3.13)$$

3.3.1. Использование станков по размеру

Диаметр детали, устанавливаемый на станке, ограничивается в большинстве случаев не диаметром над станиной – D_0 , а диаметром, проходящим над суппортом – D_c . Чем больше D_c , т.е. чем меньше высота суппорта, при одном и том же D_0 , тем большего диаметра деталь может быть обработана на станке. Для сравнения величины D_c на станках, имеющих различную величину D_0 , удобнее всего воспользоваться отношением $\frac{D_c}{D_0}$.

Поскольку каждый станкозавод и фирма стремится изготовить станок с возможно большим D_c , отношение $\frac{D_c}{D_0}$ колеблется в нешироком диапазоне. Заметно, что с увеличением D_0 отношение несколько возрастает. Это связано с тем, что высота суппорта увеличивается в меньшей степени, чем D_0 .

Как показали исследования, коэффициент использования наибольшего диаметра точения над суппортом в больших случаях не превышает 0,7. Это значит, что 65% деталей могли быть обработаны на станках меньших моделей.

В некоторых случаях заводы вынуждены производить обработку длинных деталей небольшого диаметра на крупных станках, которые обычно имеют более длинную станину.

Не чаще крупные станки догружают мелкими деталями во избежание простоев. Из множества обследуемых станков отношение $\frac{D_g}{D_c}$ не бывает больше 0,7, т.е. на заводах вместо этих станков можно установить станки с меньшим диаметром точения над станиной D_0 .

Вторым габаритным размером детали является длина. С ней связан параметр станка L_0 —наибольшая длина точения.

Поскольку в производстве встречаются различные сочетания диаметра деталей и их длины, станки имеют большое многообразие D_0 и L_0 .

Жирной линией обозначена наибольшая величина L_0 для соответствующих D_0 .

Точками обозначено наибольшее значение L_0 у имеющихся на заводах станков.

Как видно из табл.3.3, на заводах работает большое количество станков с L_0 , значительно превышающими рекомендуемыми параметрами (см. рис. 3.7).

В то же время исследование установило, что длина обрабатываемых деталей в 53% случаев составляет не более половины длины станины L_0 . Как видно, в большинстве случаев заводу необходимы станки большой длинной станины, хотя количество длинных деталей сравнительно не велико.

Табл. 3.3. Распределение станков в зависимости от D_0 и L_0

мм	Наибольшая длина точения, мм								Всего станков
	6800	8000	10000	12500	16000	20000	25000	Св. 25000	
1250	81	17	10	7	2	-	5	-	72
1600	24	26	10	2	3	1	2	-	68
2000	6	13	21	11	1	3	-	-	55
2500	4	2	4	6	1	1	6	2	26
3200	2	1	-	2	3	3	1	-	12
4000	2	-	-	-	2	-	-	-	4
5000	1	-	1	4	-	-	-	-	6

В настоящее время на заводах выходят из положения, устанавливая детали на более крупные модели станков или благодаря наличию станков иностранных фирм. Иногда заводы вынуждены идти на неудобную для них кооперацию с другими заводами.

В качестве основной модели должны выпускаться станки с короткой станиной. Изготовление станков с более длиной станиной оговаривается при заказе. Увеличение L_0 может быть осуществлено без особых трудностей путём установки дополнительных секций станины.

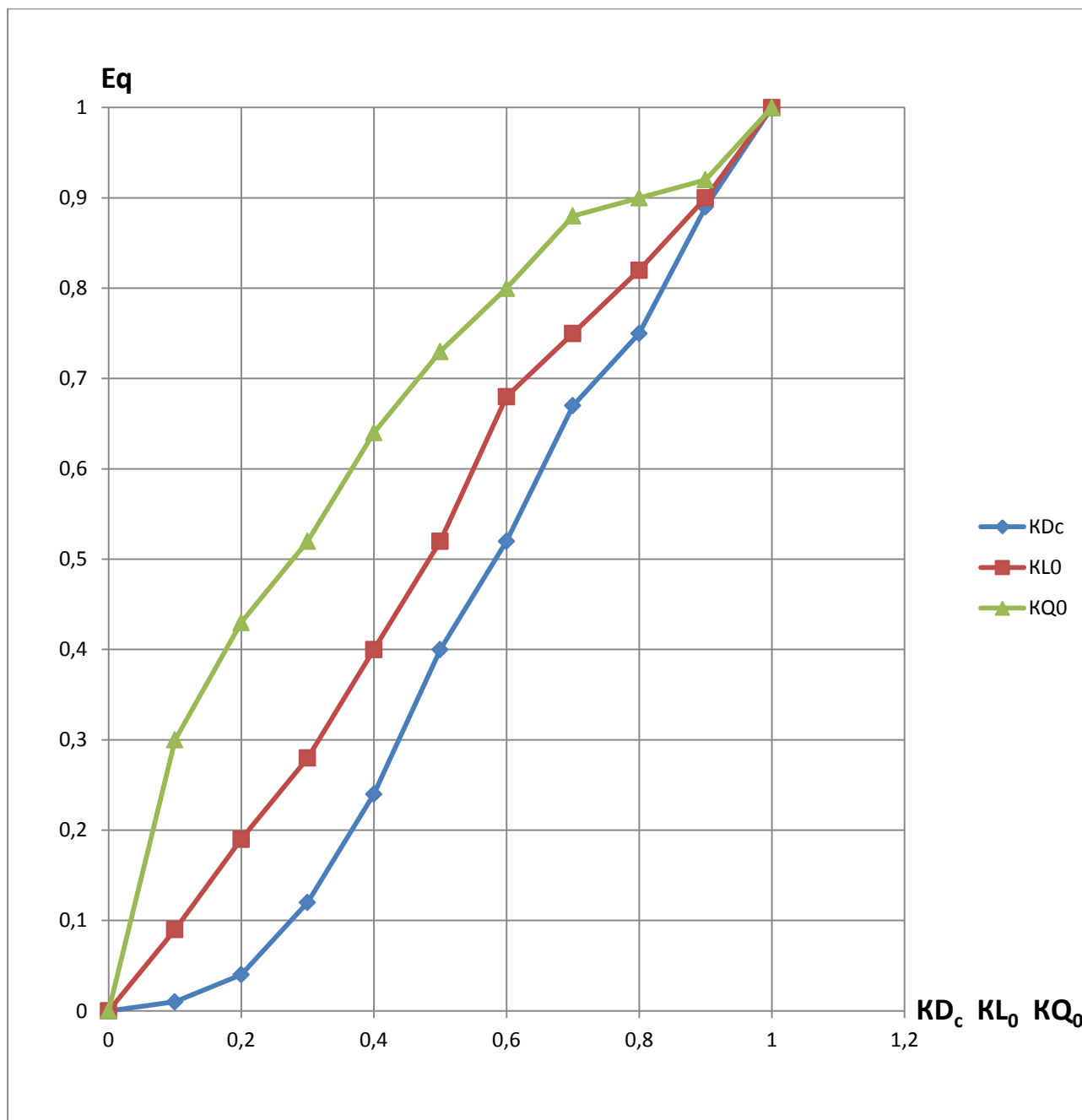


Рис. 3.7. Использование параметров станка

Для $D_0 = 1250, 1600, 2000$ необходимо предусмотреть станки с большей длинной станины.

Для станков с $D_0 = 1250$ максимальное значение $L_0 = 6300$ совершенно неприемлемо.

Для станков с $D_0 = 3200, 4000, 5000, 6300$ мм следует предусмотреть модели с уменьшенным значением L_0 , поскольку детали больших диаметров типа барабанов, роторов чаще всего бывает относительно короткими.

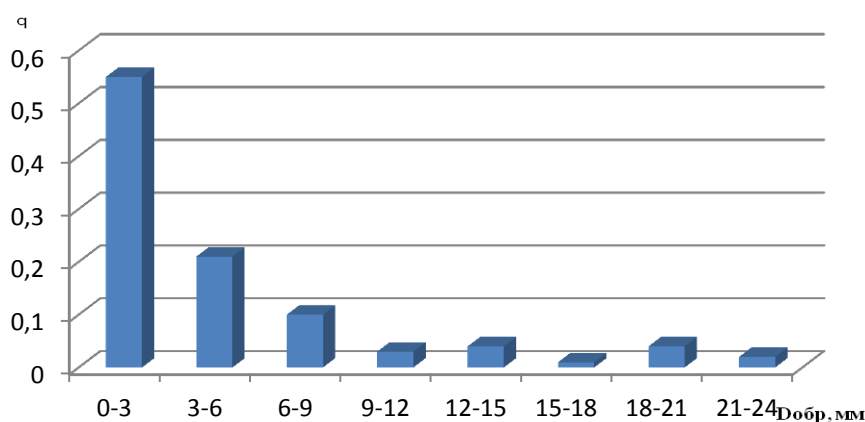
Излишняя длина станины не только неоправданно увеличивает вес станка, но и усложняет его обслуживание, ремонт, а также снижает использование производственной площади цеха.

3.3.2 Анализ веса детали

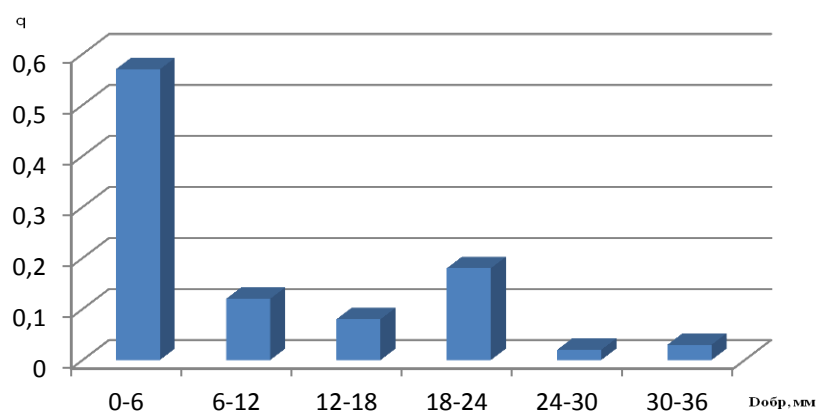
При одних и тех же габаритах детали отличаются по весу. Поэтому у станков с одним и тем же D_0 параметр Q_0 может колебаться в широких пределах, причём до $D_0 = 4000$ мм имеет место тенденция значительного увеличения максимального веса детали с ростом наибольшего диаметра точения над станиной (рис.3.8.).

Как показали исследования, средний коэффициент использования параметра станка, определяющего вес обрабатываемых деталей, в большинстве случаев очень низкое. Коэффициент K_Q в 73% случаев не превышает 0.5.

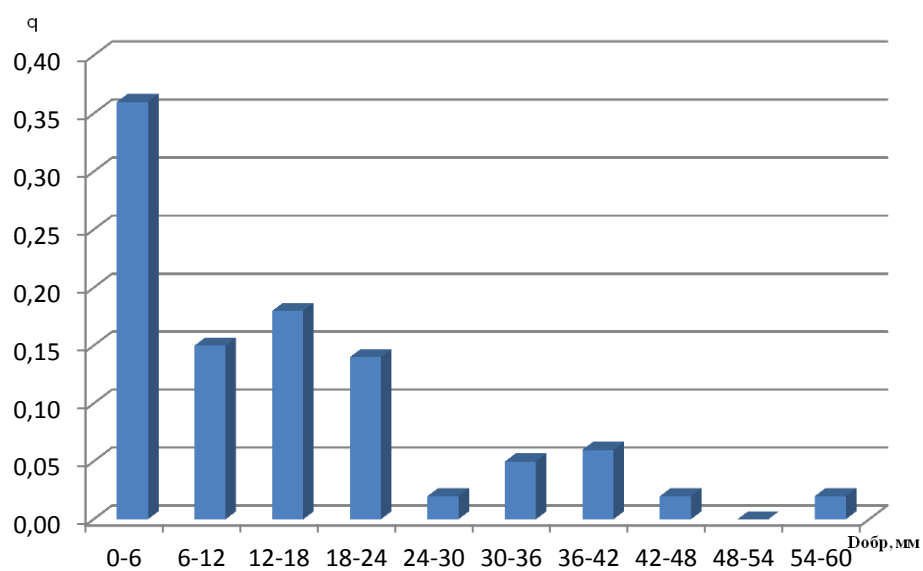
Характерно, что большинство зарегистрированных деталей имеют небольшой вес. Поэтому для станков $D_0 = 4000$ мм следует исключить модель с промежуточной грузоподъемностью, так как ей соответствует малое количество деталей. У станков с $D_0 = 5000$ мм и 6300 мм целесообразно уменьшить максимальное значение Q_0 , так как детали с таким большим весом не были ни разу зарегистрированы.



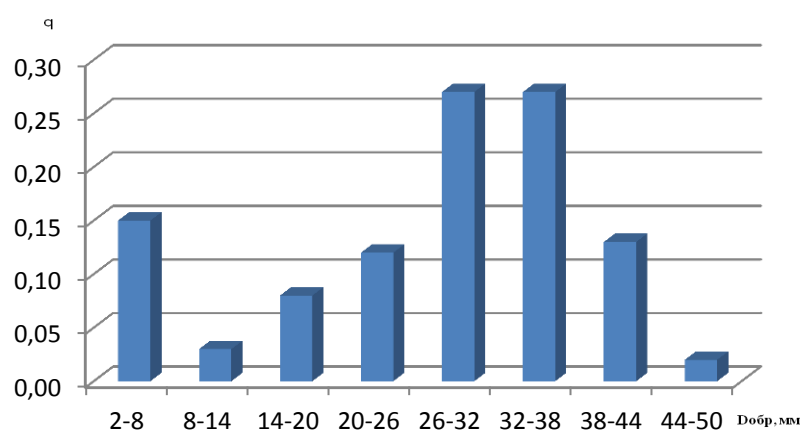
а)



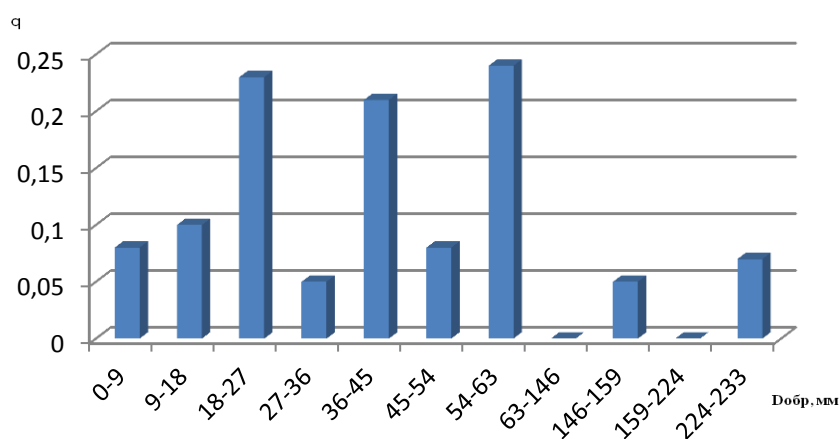
б)



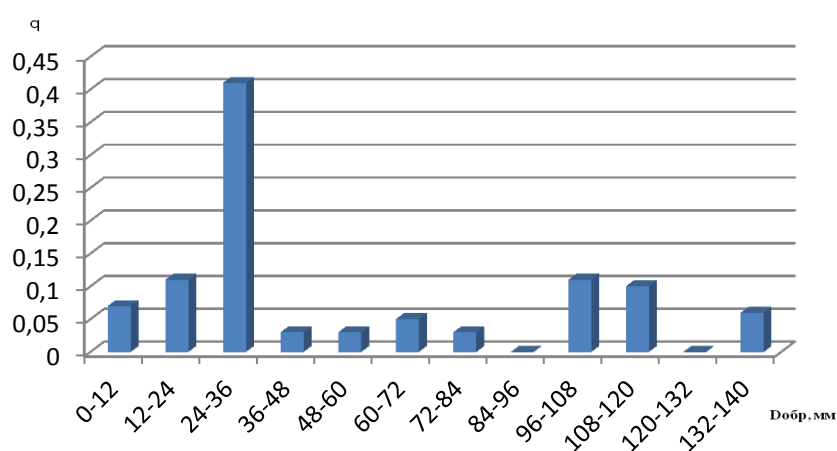
в)



г)



д)



е)

а) $D_{\max}=1250$ мм; б) $D_{\max}=1600$ мм; в) $D_{\max}=2000$ мм; г) $D_{\max}=2500$ мм;
 д) $D_{\max}=3200$ мм е) $D_{\max}=4000$ мм

Рис. 3.8. Распределение массы заготовки на тяжелых токарных станках

Учитывая указанное распределение веса деталей за основу должны быть взяты станки с меньшей грузоподъемностью.

Параметры этих станков L_0 и Q_0 определялись на основании анализа данных опроса и сведений о деталях.

3.3.3. Анализ выполняемых технологических операций

На тяжелых токарных станках выполняются разнообразные технологические операции. Наибольший объем в среднем по всем обследуемым станкам составляет обтачивание поверху, хотя на некоторых станках преимущественно выполняются другие виды обработки, на заводах, не имеющих специальных глубоковерлильных станков, некоторые станки больше половины времени используются на операциях сверления и растачивания.

На станках, выполняющих черновые операции, почти вовсе не производят таких операций, как обтачивание конусов, нарезание резьбы и обработку абразивными инструментами. Это указывает на целесообразность изготовления для крупных заводов, имеющих по несколько станков одного размера, обдирочных станков упрощенной конструкции.

Развитие техники, особенно турбостроения и электропромышленности, предъявляет все более высокие требования к чистоте поверхности и точности деталей, обрабатываемых на тяжелых токарных станках. Обследования показали, что на всех заводах имеются станки, выполняющие обработку по 3 классу точности с чистовой поверхностью, соответствующей 7 классу. Детали 2 класса точности систематически обрабатываются на многих заводах разных отраслей промышленности. Наибольшее количество станков, выполняющие точные чистовые операции, работают на заводах турбостроения и электромашиностроения, если на этих заводах станки, обеспечивающие точность 2-2а класса, составляет 65%, то на остальных заводах их 23%, причем на этих заводах некоторые черновые станки обрабатывают детали не точнее 5 класса.

Чистовые токарные станки следует выпускать по нормам точности, обеспечивающим точность диаметрального размера детали, соответствующую 2 классу, биение и овальность не превышающую 0,03 мм и точность продольных перемещений 0,1 мм.

Изучение работы точных чистовых станков показало, что такой станок должен представлять собой самостоятельную модель, а не разновидность

основной модели. Он должен быть значительно меньше по весу и габаритам, обладать достаточной жесткостью и высокой точностью перемещений его узлов. Упрощение управления станком и обеспечение надежной точности перемещений суппорта позволяет значительно сократить не только вспомогательное, но и машинное время (в частности за счет ликвидации дополнительных проходов, нужного для обеспечения точности).

Более крупных станков на заводах значительно меньше, и они обычно используются и для черновой и для чистовой обработки.

Нарезание резьбы при токарной обработки детали производится почти на всех обследованных заводах. Однако при необходимости нарезать резьбу или винтовую канавку с большим шагом заводы испытывают сильные затруднения. Резьба с шагом до 100-200 мм на деталях, обрабатываемых на станках с $D_0 = 3000$ мм, встречаются на целом ряде обследованных предприятий. Кроме этого отдельным заводам приходится нарезать резьбу с шагом до 300 и 500 мм на станках с $D_0 = 1600$ мм. На станках с $D_0 = 5000$ мм обрабатываются детали с шагом нарезки 50 мм.

При проектировании новых станков рекомендуется на модели $D_0 = 1250$ мм ставить винт, а на модели с $D_0 = 1600+2000$ мм, предусмотреть возможность установки винта, если в этом появится необходимость по длине резьбы. Кроме этого следует предусмотреть возможность увеличения шага за счет установки гитары на суппорте у станков с $D_0 = 1600$ мм до $S = 500$ мм и у станков с $D_0 = 2000+3200$ мм до $S = 200$ мм.

3.3.4. Использование суппортов

Крупные токарные станки, как правило, делаются не с одним, а с несколькими суппортами.

Одновременная обработка деталей несколькими суппортами сокращает цикл обработки, повышает производительность станка. Однако дополнительно установленные суппорта используются не в полной мере, а иногда вовсе не

используются (особенно это относится к задним суппортам). На некоторых заводах даже сняли мешающие суппорта.

Поэтому было необходимо определить условия уровень фактического использования суппортов. В основу изучения был положен метод опроса станочников, который дополнялся данными об использовании суппортов, полученными во время фотографий. Для каждого станка была определена приведенная величина использования суппортов:

$$P_c = \sum R_c^i, \quad (3.14)$$

где: R_c^i – относительная продолжительность работы суппорта.

Сравнение коэффициентов P_c , подсчитанных по данным опроса, с коэффициентами, определенными на основании фотографий рабочего дня, показывает, что результаты получаются достаточно близкими, при чем по вопросу величина коэффициента несколько выше.

Задние суппорта в некоторых случаях не используются из-за того, что они слишком громоздкие и неудобны, особенно для одновременной работы с другими суппортами. По конструкции задние суппорта не должны копировать передние, а быть легче их и конструктивно проще. Не следует делать на них поворотную часть и верхние продольные салазки.

При одновременной работе двумя и больше суппортами иногда возникает необходимость установить различную величину подачи на каждом суппорте. Отсутствие такой возможности в этом случае вынуждает отказаться от совместной работы несколькими суппортами.

3.4 Режимы резания и использования станков по мощности

Большинство параметров станка непосредственно связано с процессом резания; диапазон и ряд подач, диапазон оборотов шпинделя, наибольшее усилие резания, наибольший крутящий момент, мощность привода. На процесс резания значительное влияние оказывает материал и характер заготовки

обрабатываемой детали, материал режущего инструмента, а также режимы резания.

Величина оборотов шпинделя, крутящего момента и мощности привода зависит, кроме того, от размеров обрабатываемой поверхности.

3.4.1 Материал детали и инструмента

Анализ показал, что на тяжелых токарных станках чаще всего обрабатываются детали из углеродистой стали. Для станков с $D_0=1250-3200$ мм среднее значение временного сопротивления углеродистой стали составляет 600 Мпа, на станках с $D_0=4000-5000$ оно несколько меньше $\sigma_b=550$ Мпа. Для чистовых станков, на которых часто обрабатывается закаленная сталь, $\sigma_b=700$ Мпа.

В настоящее время основным инструментальным материалом является твердый сплав, наибольшее распространение получил сплав Т5К10, которым осуществляется черновая и получистовая обработка. Значительно реже применяется сплав Т15К6, используемый на чистовых и получистовых операциях. Другие марки твердого сплава, а также минералокерамика применяются реже. Быстрорежущий инструмент, как правило, не применяется.

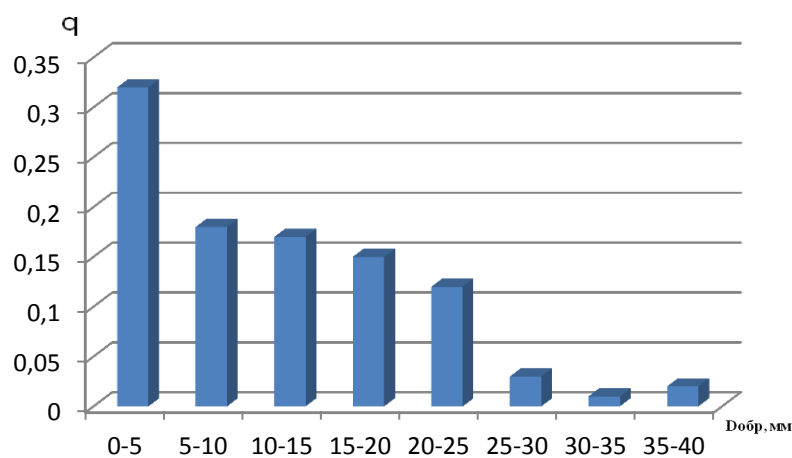
3.4.2 Элементы сечения среза

Из теории резания известно, что наиболее производительно работать с максимальной глубиной резания и наибольшей подачей, которая допускается прочностью резца. Как показали наблюдения, глубина резания обычно не превышает 20-25 мм, хотя в некоторых случаях достигает 35-40 и даже 45 мм. Средняя величина глубины резания составила 22 мм на станках $D_0=1250-3200$ мм и 25 мм на станках с $D_0=4000-5000$ мм.

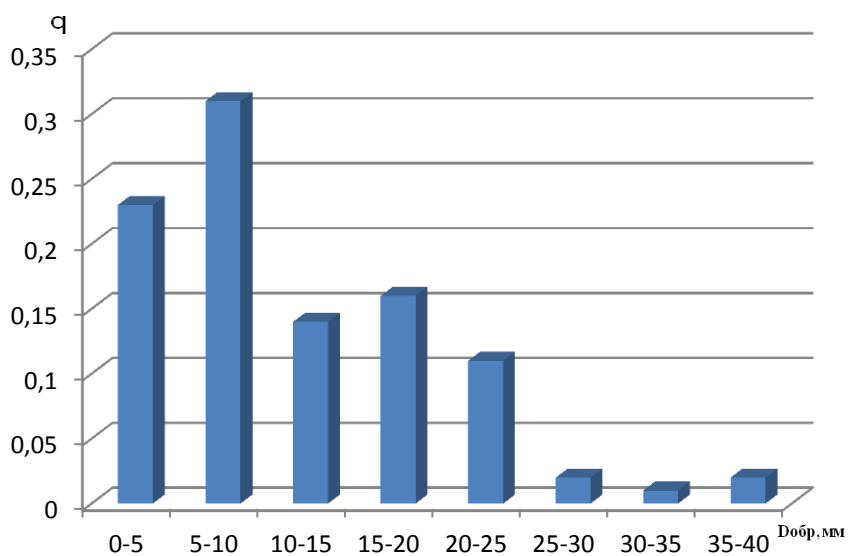
Максимально возможная глубина резания ограничивается величиной припуска и прочностью резца обработок (рис.3.9.). При черновой обработки припуск на паковках составляет 50-60 мм. А нередко доходит до 80-100 мм при

большой неравномерности. Чистовая обработка осуществляется с размерным припуском, не превышающим 10-12 мм на сторону.

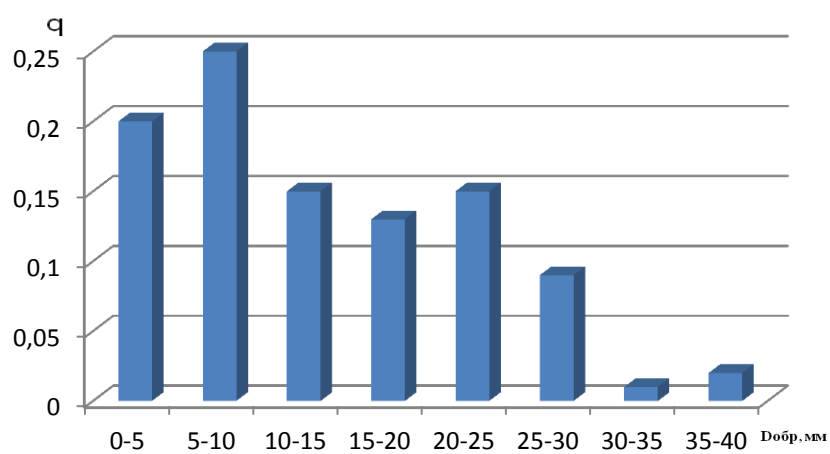
Подача, применяемая при черновой обработки твердым сплавом, находятся в основном в пределах 0,6-2,0 мм/об. Чаще всего они не превышают 1,5 мм/об. Средняя величина подачи составила на станках $D_0=1250-1600$ мм – 1,1 мм/об, на станках $D_0=3200$ мм – 1,2 мм/об. И на станках с $D_0=4000-5000$ мм – 1,0 мм/об. Такая разница в величине подачи объясняется тем, что на станках $D_0=2000-3200$ мм обрабатываются более массивные и жесткие детали.



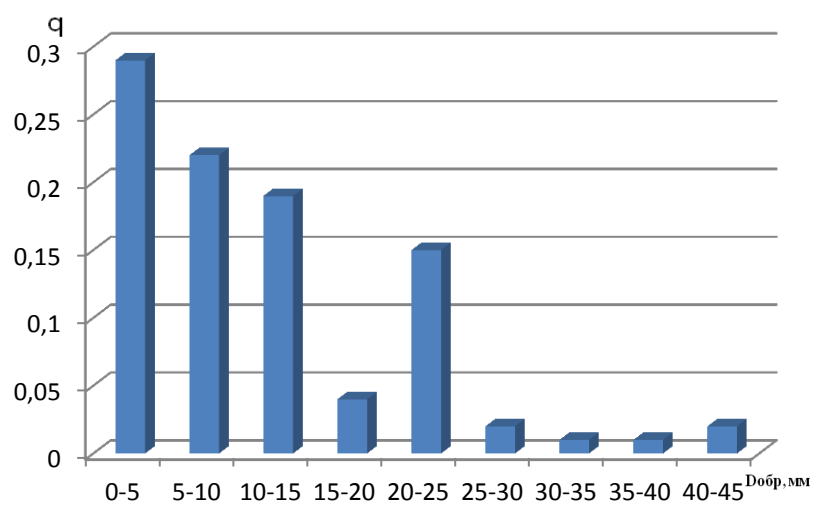
а)



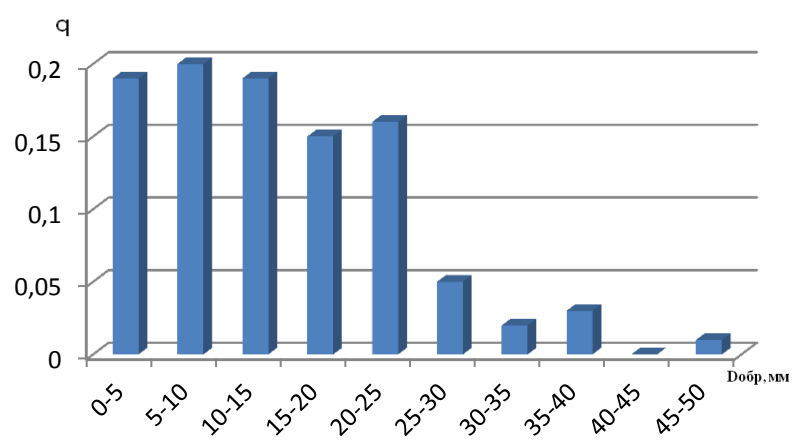
б)



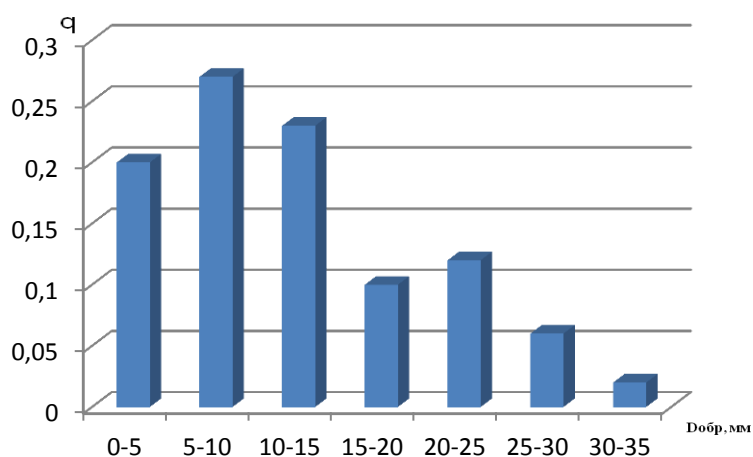
В)



Г)



Д)



е)

а) $D_{\max}=1250$ мм; б) $D_{\max}=1600$ мм; в) $D_{\max}=2000$ мм; г) $D_{\max}=2500$ мм;
 д) $D_{\max}=3200$ мм е) $D_{\max}=4000$ мм

Рис. 3.9. Распределение глубины резания на тяжелых токарных станках

3.4.3. Скорость резания, обороты шпинделя

Как показали наблюдения, в большинстве случаев величина скорости резания не превышает 60-70 м/мин, хотя в отдельных случаях достигает 100 м/мин и больше (рис.3.10.). Средняя же скорость составляет 54 м/мин.

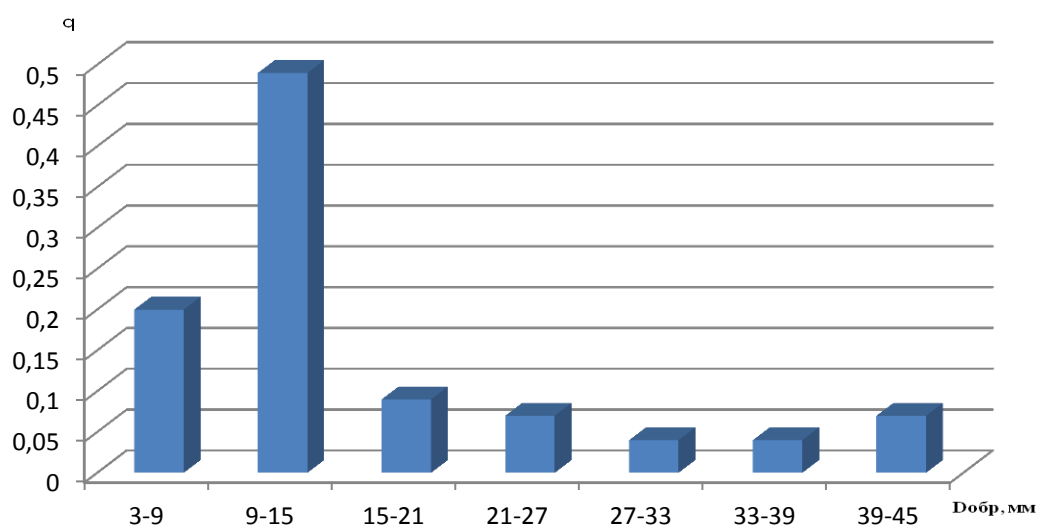
Фактические режимы резания, т.е. подача и скорость резания, как показывает сравнение, несколько ниже нормативных. Стойкость резцов колеблется в довольно широких пределах. Наиболее вероятные величины лежат в диапазоне от 50 до 70 м/мин.

Скорость резания, выбранная для обработки данной детали, определяет число оборотов шпинделя станка. Крайнее сочетание скорости резания и диаметров обрабатываемых поверхностей создают потребный диапазон оборотов шпинделя. Применяемые обороты шпинделя в некоторых случаях не захватывают всего диапазона, но не редки случаи, когда имеющийся на станке диапазон оборотов оказывается недостаточным.

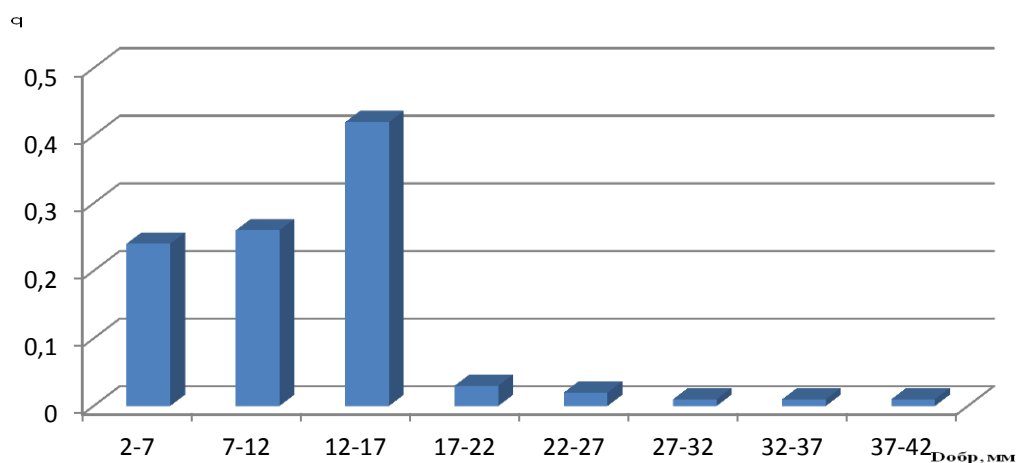
По мере увеличения D_0 диапазон оборотов шпинделя смещается в сторону уменьшения, при чем у чистовых станков они значительно шире, чем у

черновых. Встречающиеся на станках очень большие значения n_{\max} не используются. Заметно также, что для $D_0=3200$ мм и $D_0=4000$ мм n_{\max} является несколько завышенным.

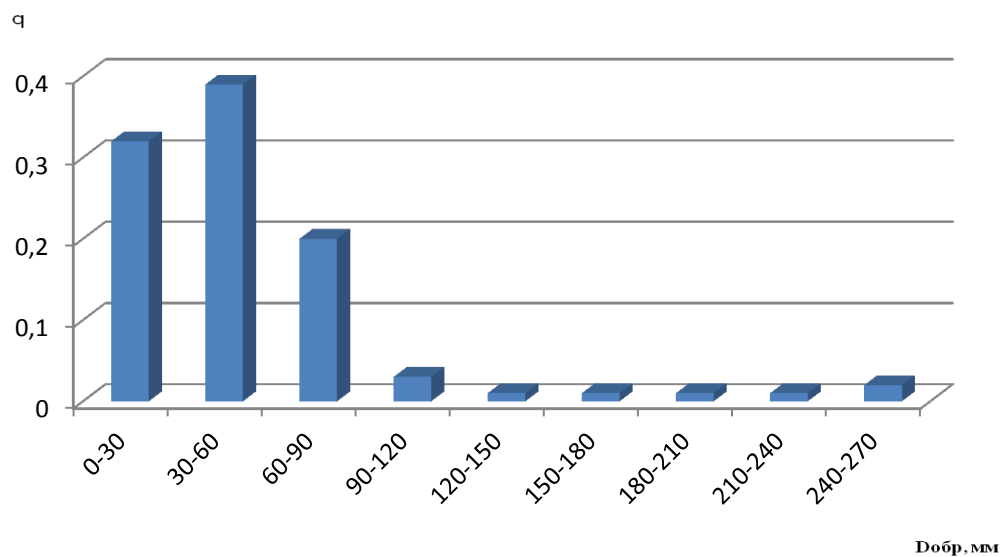
На станках с $D_0=1250-2500$ необходимо значительно уменьшить минимальные обороты по сравнению с выпускаемыми станками. На целом ряде моделей с $D_0=2500$ и больше максимальное число оборотов шпинделя может быть значительно уменьшено.



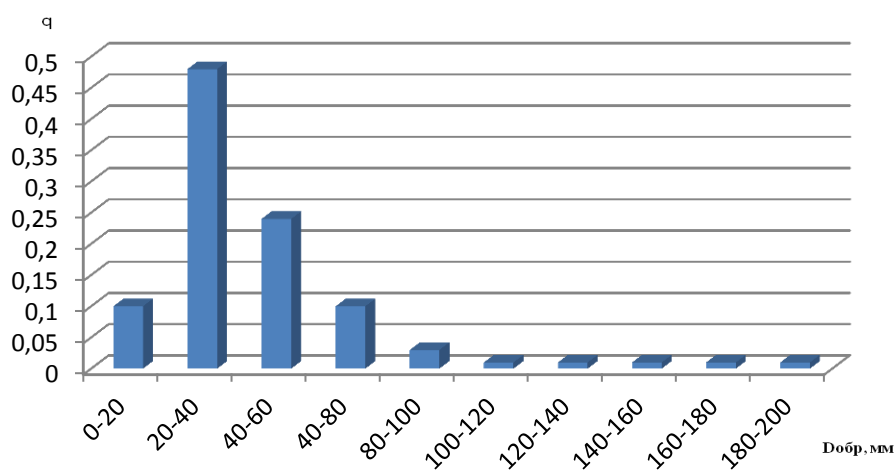
а)



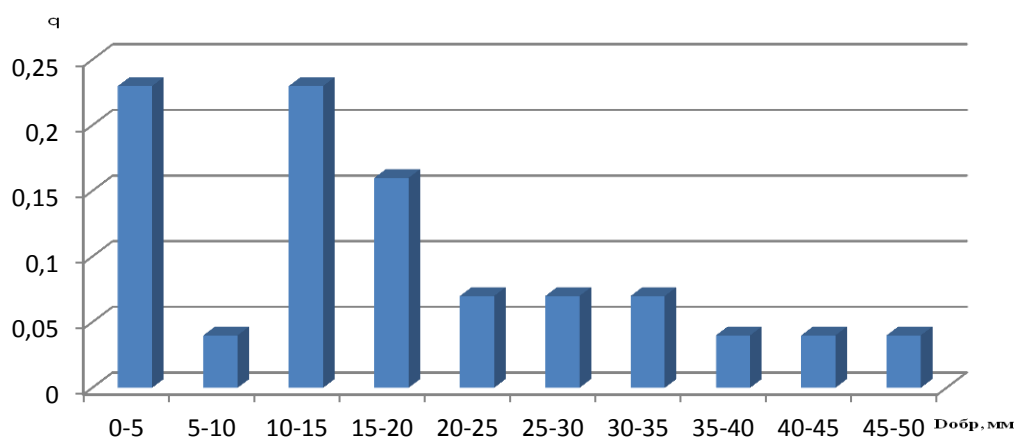
б)



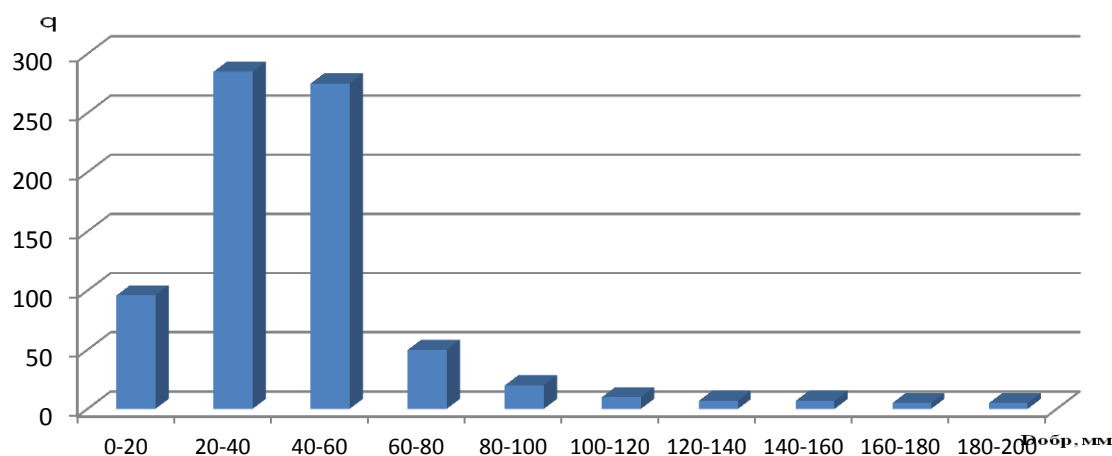
в)



г)



д)



е)

а) $D_{\max}=1250$ мм; б) $D_{\max}=1600$ мм; в) $D_{\max}=2000$ мм; г) $D_{\max}=2500$ мм;
 д) $D_{\max}=3200$ мм е) $D_{\max}=4000$ мм

Рис. 3.10. Распределение скорости резания на тяжелых токарных станках

3.4.4. Усилие резания. Крутящий момент

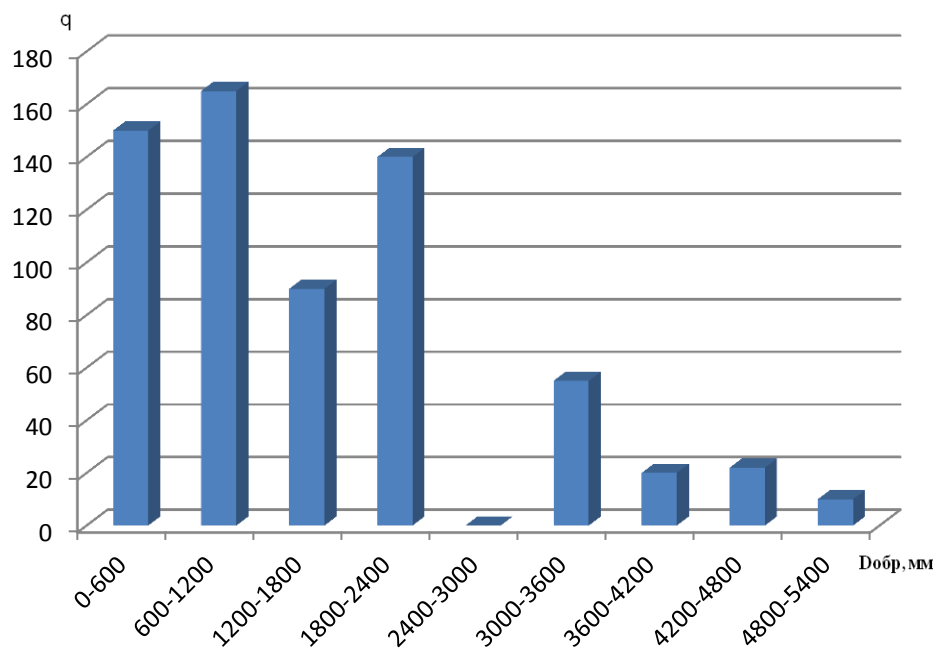
Прочность узлов станка определяется в зависимости от усилия резания и крутящего момента, возникающих при резании. Величина усилия резания очень редко превышала 50000-60000 Н. Отмечено всего несколько случаев, когда усилие резания достигало 80000-90000 Н (рис.3.11.).

На станках $D_0=4000-5000$ мм усилие более 30000-40000 Н при наблюдении не было зарегистрировано.

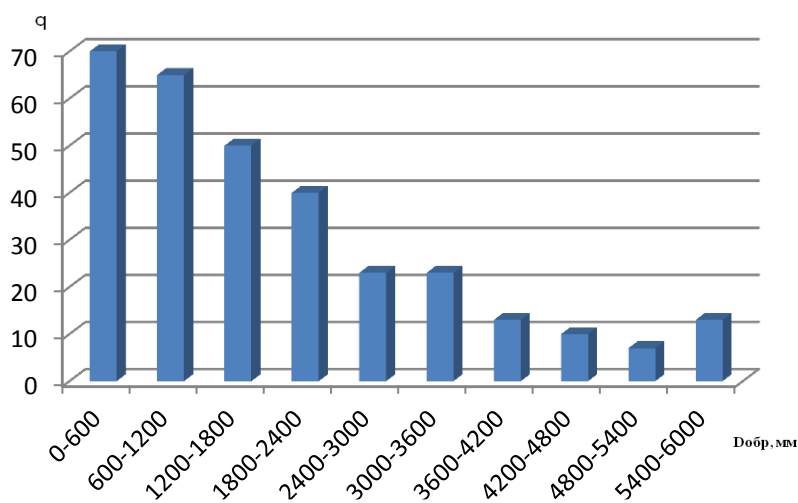
Крутящий момент зависит от диаметра обработки и, подобно усилию резания, очень редко достигает максимального значения. Как параметр станка, крутящий момент возрастает с увеличением D_0 , причем его величина на станках разных фирм различна.

При выполнении расчета величина наибольшего крутящего момента у всех станков определена по наибольшему усилию резания и диаметру обработки, равному $0,75 D_c$.

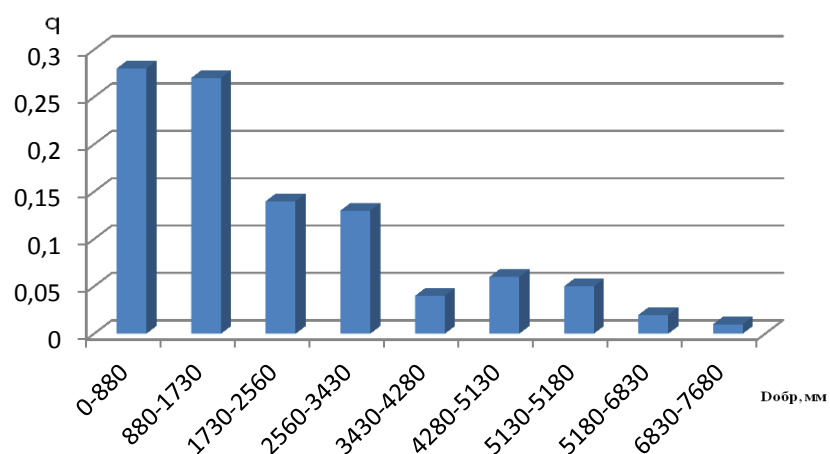
В итоге заметно уменьшение крутящего момента по сравнению с имеющимися на станках, особенно для крупных моделей. Это позволит значительно уменьшить вес станков, так как расчетная величина крутящего момента сильно влияет на вес станка. Это значит, что вес станков сожжет быть дополнительно уменьшен в результате усовершенствования конструкции станков.



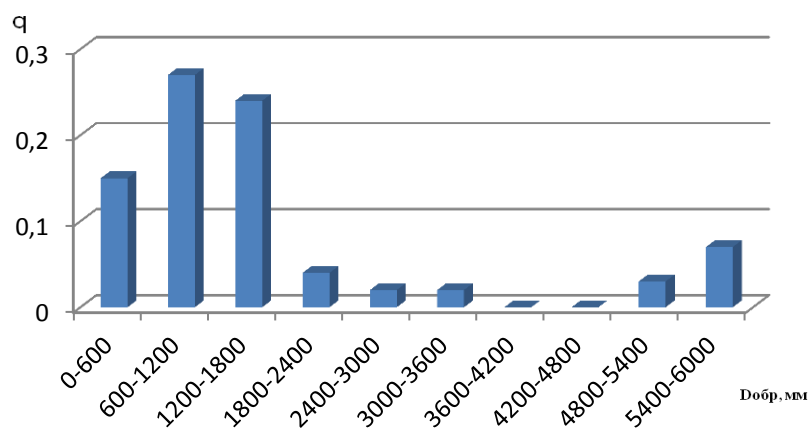
а)



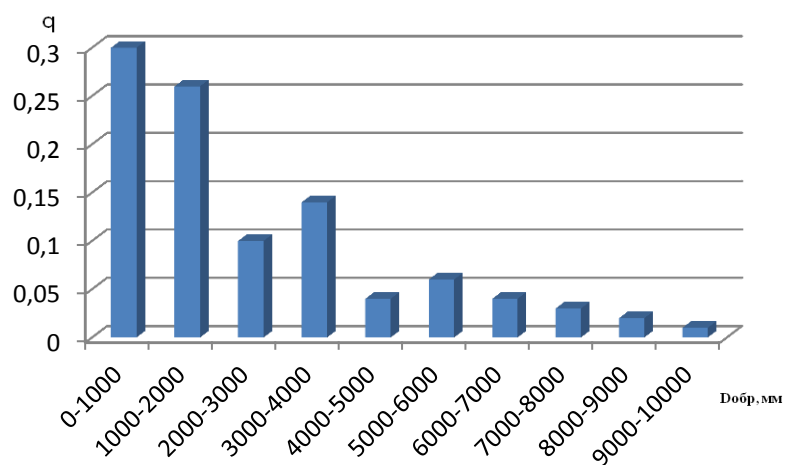
б)



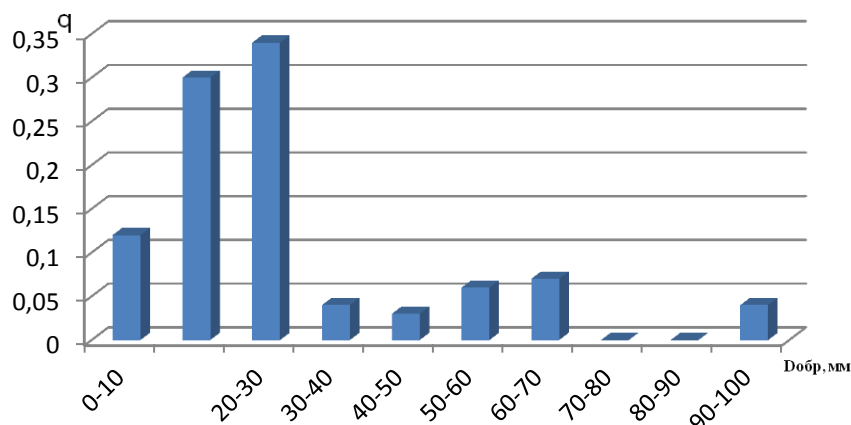
В)



Г)



Д)



е)

а) $D_{\max}=1250$ мм; б) $D_{\max}=1600$ мм; в) $D_{\max}=2000$ мм; г) $D_{\max}=2500$ мм;
 д) $D_{\max}=3200$ мм е) $D_{\max}=4000$ мм

Рис. 3 11. Распределение силы резания на тяжелых токарных станках

Выводы по разделу 3

1. Разработана база знаний о работе тяжелого металлорежущего оборудования. Проведен анализ условий обработки крупногабаритных деталей на предприятиях тяжелого машиностроения.

2. Установлено, что в условиях многономенклатурного производства технологической основой проектирования станков с ЧПУ может быть группировка деталей. Разработаны и на практике проверены признаки и критерии подбора деталей в группы. На основе кластерного анализа габаритных размеров и количества требуемых формообразующих движений проанализированы детали, обрабатываемые в условиях заводов тяжелого машиностроения.

3. Впервые проведен анализ корреляционных зависимостей длины и веса деталей, обрабатываемых на тяжелых токарных станках, от наибольшего диаметра детали.

Установлено, что в силу большого разнообразия деталей, обрабатываемых на тяжелых токарных станках, при сравнительно полном использовании диаметра точения над суппортом использование длины станины и, особенно, грузоподъемности станка в среднем является весьма низким.

4 МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ИХ РАБОТЫ

4.1 Методика структурно-параметрического синтеза тяжелых токарных станков

Процесс проектирования тяжелого металлорежущего оборудования, в наиболее полной мере отвечает требованиям большинства заказчиков, заключается в разработке его технологической структуры в виде функционально-структурной модели и обосновании основных технологических параметров (класс точности, размеры рабочего пространства, необходимые силовые параметры, режимы резания).

Разработана функциональная модель основного процесса построения функционально-структурной модели металлорежущего оборудования, что позволило установить все процессы, входящие в основной процесс, их взаимосвязь, входящую и исходящую информацию. Разработан декомпозиции основного процесса, формализуют последовательность разработки комплексных деталей-представителей определенной сложности и построения соответствующих функционально-структурных моделей станков. Разработаны математические модели, которые позволяют установить функциональные зависимости между сложностью деталей, подлежащих обработке, функциями оборудования и функциональными блоками их реализуют.

Функции станка:

$$r: S \times T \rightarrow F, \quad (4.1)$$

где r - отображение множества; $S = \{S_i\}$ - множество комплексной детали-представителя сложностью S_i ; $T = \{T_e\}$ - множество структур технологических операций, реализуемых станочной системой; $F = \{F_i\}$ - множество функций станочной системы.

$$r(S_i \times T_e) = \{F_i: (\cup S_i \times T_e) (S_i \times T_e; F_i) \in r\} \quad (4.2)$$

Определение функциональных блоков:

$$B \in \times \{B_i; i \in I\}, \quad (4.3)$$

где B' - станочная система в виде множества функциональных блоков;
 \times - символ декартова произведения; B_i - i - i -тый функциональный блок;
 I - множество функциональных блоков.

$$B \in: B_1 \times B_2 \times \dots \times B_n. \quad (4.4)$$

Отображение множества функций станка в множество функциональных блоков

$$d: F \rightarrow B. \quad (4.5)$$

Функциональные блоки B_i , обеспечивающие заданную функцию:

$$d(F_i) - (\{ B_i \} : (\exists F_i) (F_i; B_i) \in d) . \quad (4.6)$$

Конечное подмножество функциональных блоков $\{B_i\}$, необходимых для реализации функциональной модели станка в целом:

$$\cup d(F_i) - \{ B_i / \exists (m \in M) \wedge B_i \in d(F_i) \}, \quad (4.7)$$

где M - множество образов функций $(F_b \dots, F_i) \in F$ при отображении d ;
 m - элемент множества M .

Унифицированный состав функциональных блоков для создания необходимых станков:

$$B_i = [\cup (\cup d(F_i)) \in B \forall (F_i) \in F] . \quad (4.8)$$

Взаимосвязь множеств функций различных уровней:

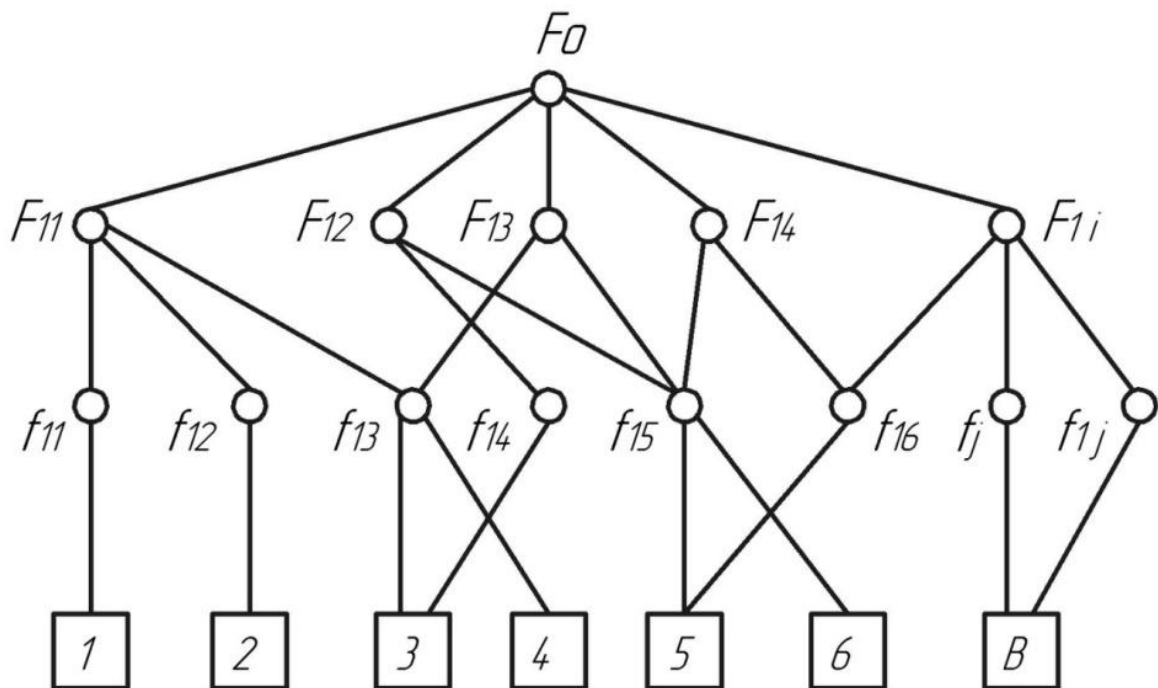
$$F = \{F_0\} \times \{F_{1i}\} \times \{f_{ij}\}. \quad (4.9)$$

Возможный состав блоков:

$$A || B_i \times f_{ij} ||, \quad (4.10)$$

где a_{ij} – элементы матрицы; $i = 1, n, j = 1, n$ – число вспомогательных функций и блоков

Предложены зависимости для определения унифицированного состава функциональных блоков для построения всей гаммы нового оборудования на единой элементной базе. Общий вид функционально-структурной модели станка с ЧПУ представлен на рис. 9



F_0 - общесистемная функция; $F_{11} \dots F_{1i}$ - основные функции;
 $F_{1i} \dots f_j$ - вспомогательные функции; B - функциональные блоки станка

Рис. 4.1. Общий вид функционально-структурной модели станка с ЧПУ

С применением функционально-стоимостного анализа [42,43] сформулированы главная, основные и вспомогательные функции станка и разработана его обобщенная функциональная модель. В качестве основных функций станка приняты его формообразующие координаты, от состава которых в основном зависит эффективность оборудования. Разработаны функционально – структурная модель станка, что согласовывает функции с функциональными блоками.

Предложены формулы для оценки значимости функций нового станка и определение функционально оправданных расходов на их реализацию.

Построение функционально-структурной модели позволяет установить комплекс необходимых и достаточных (оптимальных) функций, реализуемых станком, и исполнительных механизмов, их обеспечивающих (агрегатов, узлов и т.п.).

4.2 Рекомендации по проектированию тяжелых токарных станков с ЧПУ

Наиболее вероятные длины деталей лежат в диапазоне от 3 до 9 м, они несколько повышаются при увеличении D_o свыше 1250 мм и в дальнейшем остаются постоянными. С ростом D_o от 1250 до 5000 мм максимальные длины деталей уменьшаются от 24-27 м до 12-15 м.

Наиболее вероятный вес деталей при изменении D_o с 1250 до 3200 мм повышается с 0-10 тонн до 25-50 тонн и остается при дальнейшем росте D_o примерно постоянным. Максимальный вес деталей увеличивается с 50-75 до 200-250 тонн. Так как на станках $D_o = 5000$ и 6300 мм обрабатывается преимущественно сварные детали, рекомендовано предусмотреть их грузоподъемность не более 200 тонн.

Станки с $D_o=1250, 1600$ и 2000 мм, имеющие $L_o = 25$ м, а также $D_o= 2500$ мм с $L_o =20$ м для более полного использования длины станины рекомендуется укомплектовывать двумя передними и двумя задними бабками.

Проведено сравнение отношения наибольшего диаметра точения над суппортом к диаметру точения над станиной для станков КЗТС и станков иностранных фирм. Малая величина этого отношения на станках КЗТС ухудшает использование D_0 . Увеличение D_c может быть достигнуто за счет уменьшения высоты каретки и наличия скосов на задней стороне.

Изучено разделение станков по характеру обработки на черновые, смешанные и чистовые, а также впервые проведен статистический анализ применимости различных технологических операций. На основании полученных данных, а также анализа использования станков по мощности рекомендованы три группы станков: общего назначения, чистовые и черновые. Легкие чистовые станки, обеспечивающие точность диаметра не ниже 2 класса и биение не более 0,03 мм требуются для обработки особо точных деталей диаметров до 2000 мм ($D_0 = 2500$ мм). Для обработки роторов паровых и газовых турбин целесообразно применение специализированных станков, изготовленных на базе чистовых. Черновые станки следует изготавливать с $D_0=1250 - 2000$ мм на базе станков общего назначения для заводов с большим объемом обдирочных работ. Конструктивно эти станки должны быть проще (меньше диапазоны оборотов шпинделя подачи, отсутствие механизмов для нарезания резьбы и обтачивания конусов, отсутствие поворотной части суппорта, меньшая точность изготовления).

На основании статистического анализа применимости суппортов, установлено, что дополнительные суппорта, особенно задние-, используются редко. Наиболее вероятное использование 2-го суппорта на 2-х суппортных станках, 3-х и 4-х суппортных не превышает 10 %. Предложенное количество суппортов обеспечивает более полное их использование. Каждый суппорт должен иметь независимую подачу и обеспечивать возможность подвода резца к центру без перемещения верхних салазок. Задние суппорта следует делать конструктивно проще и легче, чем передние.

Установлено, что на станке $D_0=1250$ мм необходимо иметь винт для нарезания резьбы, а на станках $D_0=1600 - 2000$ мм следует предусмотреть

возможность установки винта. Кроме этого требуется предусмотреть возможность увеличения шага нарезаемой резьбы.

Установлено, что поперечное смещение задней бабки для обработки конусов почти совсем не применяется, а используется только при установке бабки в процессе монтажа и после ремонта. Для обтачивания длинных конусов желательно иметь возможность для совмещения продольной и поперечной подач.

Получены данные о применяемости обрабатываемых и инструментальных материалов. Свыше 80% всей механической обработки осуществляется твердосплавным инструментом.

Средняя глубина резания при выполнении черновых операций твердосплавными резцами на станках $D_0=1250 - 3200$ мм составила 20 мм и на станках $D_0=4000 - 5000$ мм - 25 мм. Максимальные глубины резания доходят до 45 мм.

Подача во время черновой обработки твердосплавным инструментом не выходила из пределов 0,6 - 2,0 мм/об. Средняя величина подачи на станках $D_0=1250 - 1600$ мм составила 1,1 мм/об, на станках $D_0=2000 - 3200$ мм - 1,2 мм/об и на станках $D_0=4000 - 5000$ мм – 1,5 мм/об. При чистовых операциях подачи были в пределах от 0,05 мм/об до 40 мм/об.

Применяемые сечения среза ниже допускаемых прочностью твердого сплава. Установлены целесообразные диапазоны подач для различных групп станков.

Средняя скорость резания при черновых операциях составила 54 м/мин (при наиболее вероятной стойкости 50 - 70 мин). Наибольшие значения скорости резания, как и подачи имеют место на станках с $D_0= 2000 - 3200$ мм. В большинстве зарегистрированных случаев режущие возможности твердого сплава использовались не полностью.

Проведен статистический анализ использования диапазона оборотов шпинделя на разных группах станков. На основании данных этого анализа и расчета рациональных режимов резания с учетом усовершенствования

режущего инструмента предложены целесообразные диапазоны оборотов шпинделя.

Установлено, что в подавляющем большинстве случаев вертикальная составляющая силы резания не превышает 80 - 90кН. Наиболее вероятные величины сил лежат около 30кН. С учетом увеличения сечения среза за счет роста подач в будущем определены расчетные величины сил для станков разных моделей.

Получено, что с ростом D_o до 2000 мм наибольшая фактическая величина $M_{кр}$ резко возрастает, но не превышает 700Нм. Наиболее вероятная величина $M_{кр}$ не выходит за пределы 100 Нм. Станки, установленные на ПАО НКМЗ рассчитаны на чрезмерно большой $M_{кр}$ (в 3-5 раз больше максимально наблюдаемого). В работе выполнен расчет крутящих моментов и определены их величины для гаммы станков.

Средний коэффициент использования станков по мощности с ростом D_o от 1250 до 5000 мм уменьшается от 0,8-0,45 до 0,05-0,1, причем меньшие величины относятся в основном к чистовым станкам. Максимальные значения этого коэффициента на большинстве крупных станков не превышают 0,8-0,5, в то же время многие черновые станки с $D=1250$ мм имеют K_N более -1,0.

Средняя мощность резания с ростом D_o до 2000 - 2500 мм возрастает для чистовых станков до 12 кВт и черновых станков до 19 кВт, а затем уменьшается. По такому же закону изменятся максимальная величина мощности резания. Среднесменная мощность, потребляемая станком, не превышает 90 кВт, а максимальная 150 кВт. На основании полученных статистических данных проведен расчет мощности электродвигателей главного привода станков. Предложено несколько уменьшить мощность крупных станков, а также поставлен вопрос о конструктивной проработке и экономическом анализе эффективности установки на крупных станках второго электродвигателя малой мощности.

На основании математической обработки литературных данных, относящихся к станкам различных фирм, получены степенные зависимости

ряда параметров станков (Q_o , n_{\max} , n_{\min} , $M_{кр}$, N и др.) от D которые были использованы при разработке типажа.

Машинное время является основным элементом времени и составляет в среднем 62%. Вспомогательное время занимает 23% продолжительности смены. Из-за разного рода простоев теряется 10% сменного времени. Зависимость приведенного коэффициента машинного времени от диаметра имеет максимум при $D = 2500-3200$ мм. На черновых наиболее часто повторяется K_m^1 в пределах 0,65-0,90, а на чистовых – 0,50- 0,70. На установку и крепление детали затрачивается в среднем 36% вспомогательного времени, установку и крепление инструмента - 28%, контроль деталей - 27% и управление станком - 9%.

С увеличением размеров станка наиболее заметно увеличение времени управления станком. Поэтому, на крутящих станках особенно необходимо дистанционное управление.

Механизация зажима детали и инструмента является особенно важной, так как позволяет не только повысить производительность на 4-8%, но главное облегчает труд рабочего и делает его более безопасным. Время на установку и закрепление резцов может быть также сокращено благодаря применению резцедержательных головок, а также промежуточных державок для небольших резцов.

Целесообразно применение измерения деталей во время обработки, а также использование индикаторных упоров на суппортах чистовых станков и лимбов или линеек для отсчета продольных перемещений. Линейки бывают нужны и на пиноли задней бабки.

Конструкция и точность изготовления станка сильно влияют на производительность при чистовой обработке точных деталей.

Выявлена структура времени простоев. С ожиданием крана связано 40% времени потерь, с организационными неполадками - 23% и ремонтом станка - 24%.

Из-за уборки стружки в среднем теряется до 2% сменного времени. Значительные трудности вызывает извлечение стружки из ям. В связи с этим следует считать целесообразным создание механизмов для переработки стружки и её удаления.

Простой станка в связи с ожиданием крана для установки инструмента и т.п. на тяжелых станках доходят до 2% сменного времени. Поэтому тяжелые станки следует укомплектовать местными подъемниками грузоподъемностью 0,5-1,0 т.

Разработан и проверен метод анализа использования станков во времени на основании данных об их состоянии в каждый момент времени. Этот метод позволяет во много раз уменьшить затраты времени на определение средних данных об использовании оборудования.

Проведенное статистическое обследование использования универсального оснащения и анализ обрабатываемых деталей, требующих его применения, показывают, что единые решения по этому поводу не могут быть найдены.

Установлено, что вследствие большого многообразия различных факторов, влияющих на целесообразность применения универсального оснащения на тяжелых токарных станках, подавляющее большинство оснащения должно поставляться только по специальному заказу [15,149,150]. К таким видам оснащения относятся: открытые, закрытые и полужакрытые люнеты всех размеров, фрезерные, сверлильные, расточные и шлифовальные приспособления.

В новой гамме тяжелых токарных станков должны быть вновь разработаны следующие обязательные виды дополнительного оснащения, расширяющие технологические возможности станков, механизмирующие трудоемкие ручные операции:

а) стационарное приспособление для фрезерования шпоночных пазов, сверления, растачивания и нарезания поперечных отверстий с осью вращения инструмента перпендикулярно к линии центров станка;

- б) стационарное приспособление для обработки пазов, сверления и нарезания фланцевых отверстий с осью вращения инструмента параллельно линии центров станка;
- в) съемное шлифовальное приспособление для шлифования внутренних поверхностей;
- г) приспособление для обычного и глубокого сверления и растачивания центральных отверстий;
- д) местные подъемные средства;
- е) гидравлические приспособления для закрепления детали, инструмента, пиноли задней бабки, люнетов;
- ж) устройства для активного контроля диаметральных размеров крупногабаритных деталей;
- з) комплекс агрегатов для дробления и транспортирования стружки от станка;
- и) приспособление для обточки галтелей $R > 30$ мм.

4.3 Критерии оптимизации и ограничения на управляемые параметры процесса механической обработки на тяжелых станках

Задача определения рациональных регламентов процесса резания, решаемая с учетом всех технологических, технико-экономических факторов является многокритериальной. Критериями эффективности при определении регламентов процесса резания могут быть все выходные параметры процесса, каждый из них и любое их сочетание [14, 143, 144].

Часть выходных параметров, не являющихся критериями эффективности, служат ограничениями и определяют область допустимых решений при определении сочетания элементов режима резания (рис.4.2).

С увеличением числа ограничивающих условий повышается трудоемкость расчетов и снижается их точность, т.к. в этом случае область рациональных режимов резания не всегда совпадает с экстремальными точками целевой функции, а находится на линии пересечения наиболее сильного

ограничения с поверхностью, отражающей область существования целевой функции.

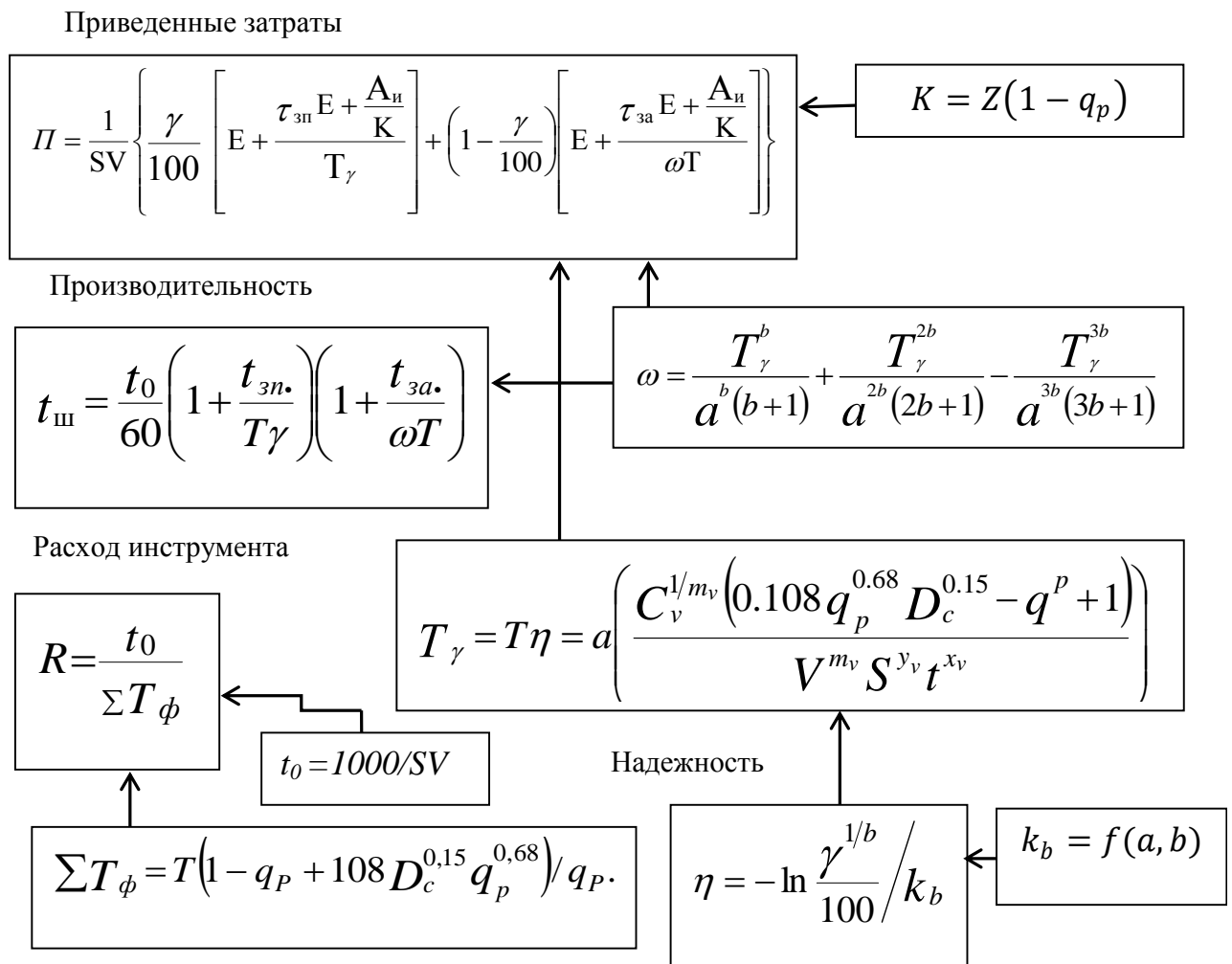


Рис. 4.2. Схема нахождения оптимального сочетания элементов режима резания

В качестве одного из основных критериев эффективности процесса обработки на тяжёлых токарных станках приняты приведенные затраты, учитывая большую стоимость тяжелых токарных станков и большие производственные площади, занимаемые ими.

Формирование целевого функционала производилось с учетом лишь части затрат, зависящих от режима обработки.

Выявлены критерии оптимизации и ограничения на управляемые параметры процесса обработки на тяжелых станках. Критерием оптимальности выбран показатель производительности. Ограничениями выступают: прочность и жесткость режущего инструмента; точность обработки; мощность электропривода главного движения станка; заданная производительность станка на операции; наименьшая скорость резки.

Система целевых функций и ограничений для оптимизации режимов резания на тяжелых станках приведена на рисунке 4.3. Многокритериальная оптимизация выполнялась с использованием пакета программ, разработанных в ДГМА. Оптимизация режимов резания осуществляется по критериям: приведенные затраты, производительность с учетом необходимого уровня надежности инструмента и вероятности его разрушения. Соотношение критериев, их весовые коэффициенты зависят от потребности производственной ситуации. Математическая модель приведенных затрат, которые зависят от подачи S и скорости резания V , сформирована с учетом γ -процента (уровня надежности инструмента), стоимости инструмента A_i , числа периодов устойчивости K для пластины с Z гранями, стоимости станочного времени E , периода замены инструмента t_z , а также доли периода стойкости инструмента ω , связанной с его аварийными отказами. Распределение периода устойчивости T соответствует закону Вейбулла-Гнеденко с параметрами a и b . Для учета необходимого уровня надежности инструмента введено коэффициент η , определяющий гамма-процентный период стойкости T_γ , величина которого является частью среднего периода T , учитывает вероятность разрушения инструмента q_r при обработке деталей на станке с типоразмером ДС.

Производительность обработки определяется периодами искусственного $t_{шт}$ и основного t_o времени, которые зависят от S и V . Расход инструмента R определяется t_o и величине фактического суммарного периода стойкости инструмента ΣT_ϕ .

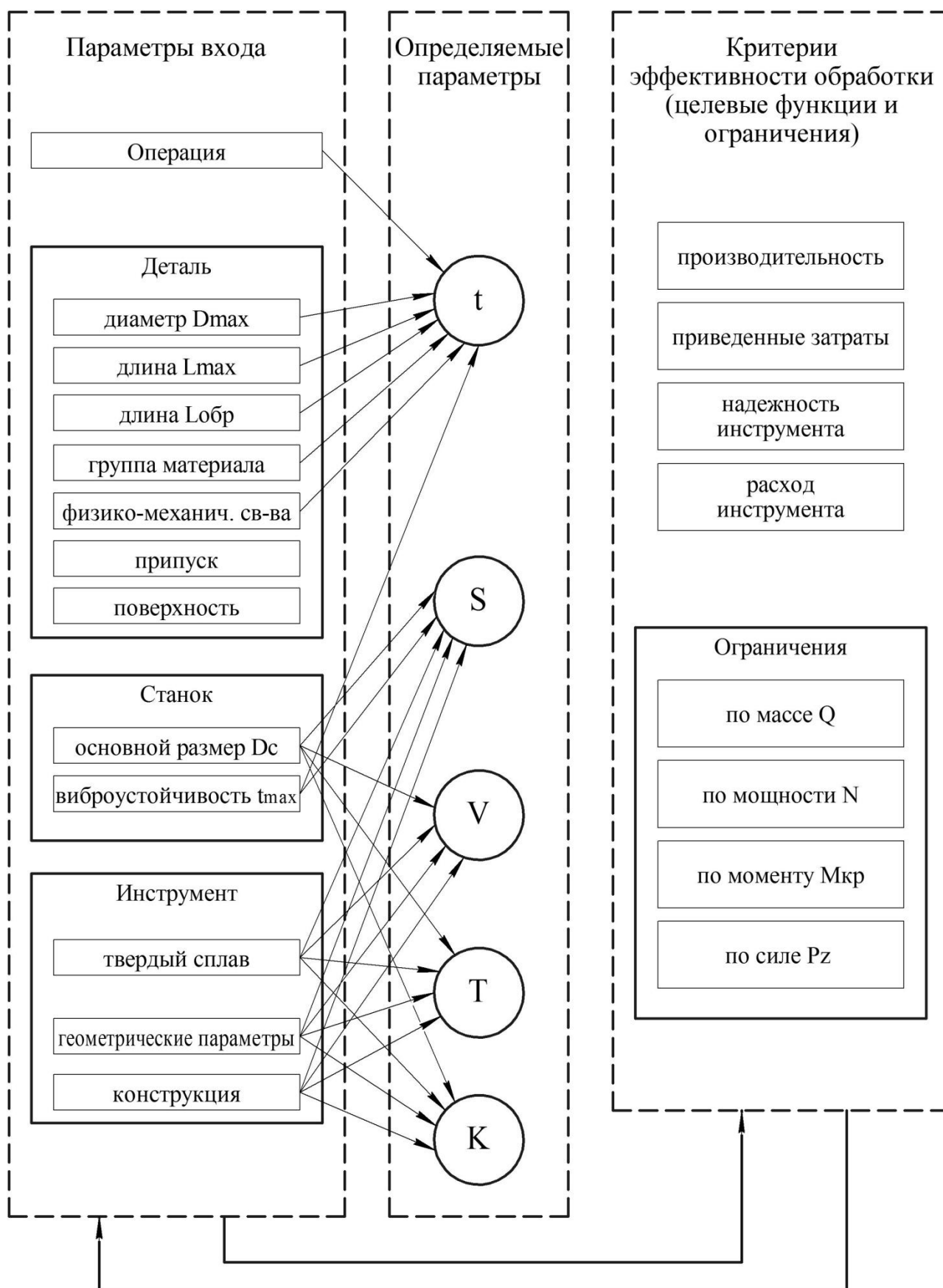


Рис. 4.3. Основные факторы и связи между ними при определении режимов резания [41]

На основании расчетных значений режимов резания, параметров расхода инструмента для «узловых» точек и использования математических моделей, полученных экспериментально, разработанные Общемашиностроительные нормативы резания. В отличие от ранее существовавших, новые нормативы режимов резания предусмотрели: переход от универсальных станков на станки с ЧПУ, новые обрабатываемые и инструментальные материалы, выбор новых конструкций режущих инструментов и их учета при назначении режимов резания; дифференцированный расчет подач в зависимости от многих факторов; учета жесткости и виброустойчивости технологической системы при выборе инструмента и назначении регламентов его эксплуатации; учета ограничений на режимы резания с целью обеспечения заданной надежности инструмента и требований эргономики; расчет расхода инструмента, исходя из вероятности его разрушения; измененную форму основных таблиц, предназначенных для конкретных условий металлообработки и минимальных затрат времени технолога-нормировщика.

Нахождение оптимального, с точки зрения приведенных затрат, сочетания элементов режима резания состоит в выборе таких значений, которое соответствует минимуму или максимуму критериев оптимальности.

Поскольку оптимизация глубины резания при черновой обработке связана с величиной и рассеиванием припусков на механическую обработку, которые в свою очередь обусловлены размерами деталей и точностью существующих технологических процессов получения заготовок, она производится отдельно от оптимизации подачи и скорости резания.

Таким образом, оптимизация режимов резания осуществлялась одновременно по двум переменным – подаче S и скорости резания V (или частоте вращения детали n) [15,149,150].

4.4 Характеристики износостойкости режущего инструмента и обрабатываемости материалов

При обработке резанием в качестве основной характеристики износостойкости инструмента используется стойкость T . Стойкость определяется как время работы режущего инструмента, по истечении которого достигается заданный критерий затупления h^* . Ограничение по износостойкости удовлетворяется путем подбора режимов резания, обеспечивающих заданную стойкость. Величина выбранной стойкости обосновывается экономически, например, из условия минимума технологической себестоимости операции [41]. Стойкость характеризует конечный результат, но не саму историю износа инструмента за период стойкости. Со стойкостью связаны путь резания L

$$L = V \cdot T \quad (4.11)$$

и площадь поверхности, обработанной инструментом за период стойкости

$$F = V \cdot S \cdot T. \quad (4.12)$$

Стойкость тесно связана с критерием затупления h^* , который в свою очередь может характеризоваться при одних условиях износом по задней поверхности h_z^* , а в других – износом по передней поверхности h_n^* .

Известно, что зависимость износа h от пути резания или от времени работы инструмента в общем случае условно может быть разбита на три зоны: зону первоначального износа ($h < h_0$), зону нормального износа ($h_0 < h < h_{кр}$) и зону катастрофического износа ($h > h_{кр}$), рис. 4.4 (а, б). С точки зрения рациональной эксплуатации режущего инструмента небезразлично в какой из трех названных зон достигается выбранный критерий затупления.

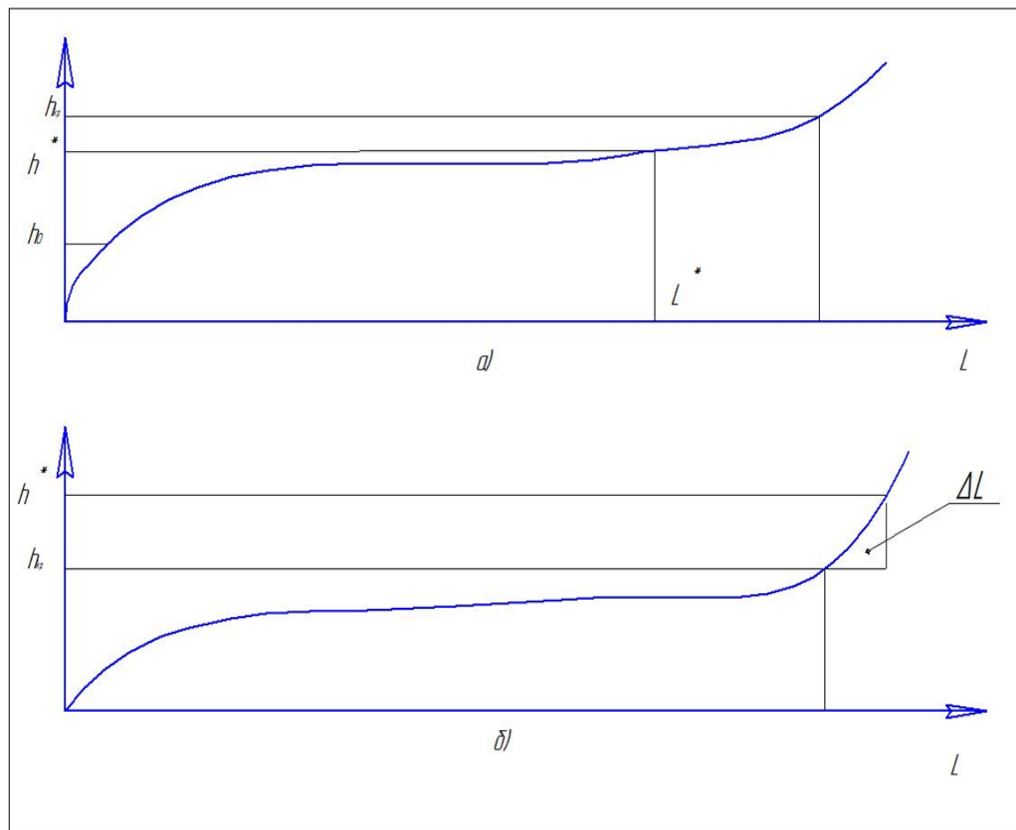
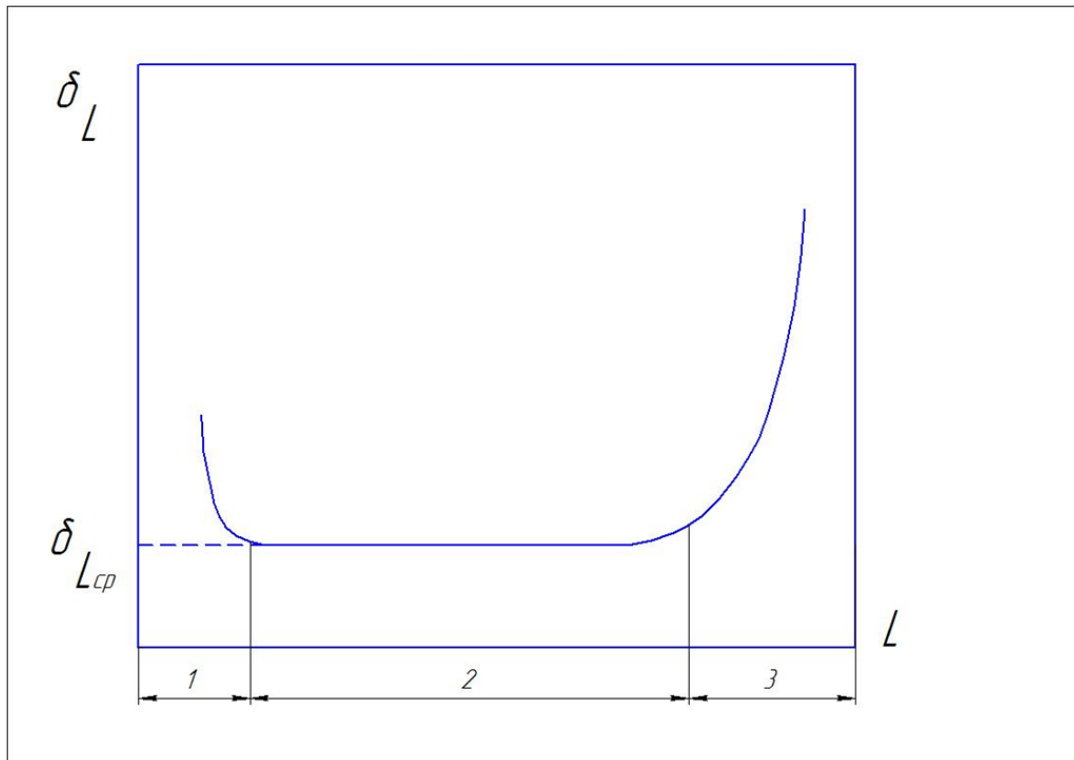


Рис. 4.4. Типичные зависимости износа h от пути резания L



1-зона приработки; 2 – зона нормального износа;

3 – зона катастрофического износа

Рис. 4.5. Изменение интенсивности износа δ_L по пути резания L

Особенно важно это обстоятельство учитывать при обработке конструкционных сталей, поскольку в этом случае наклоны кривой $h(L)$ в зонах нормального и катастрофического износов особенно резко отличаются (рис. 4.4 б). Это связано с качественными изменениями механизма износа инструмента, вызванными потерей прочности режущего инструмента при достижении достаточно высоких температур на контактных поверхностях инструмента.

Интенсивность изменения износа инструмента по пути резания может быть охарактеризована дифференциальной характеристикой δ_L

$$\delta_L = \frac{dh}{dL}. \quad (4.13)$$

В зоне нормального износа интенсивность износа δ_L практически постоянна и может быть оценена своим средним значением (рис. 4.4 а, 4.5)

$$\delta_L \approx \delta_{Lcp} = \frac{h^* - h_0}{L^*} = \frac{h^* - h_0}{VT}, \quad (4.14)$$

а в зоне катастрофического износа интенсивность δ_L резко возрастает (рис.4.5)

$$\delta_L = \frac{h^* - h_{кр}}{\Delta L} > \delta_{Lcp}. \quad (4.15)$$

Как следует из формулы (4.14), между интенсивностью износа δ_L и стойкостью T существует связь. В общем случае она может быть представлена соотношением

$$VT = \int_0^{h^*} \frac{dh}{\delta_L(h)}. \quad (4.16)$$

Интенсивность износа δ_L более тесно, чем стойкость T , связана со свойствами инструментального и обрабатываемого материалов и режимами резания. В связи с этим стойкость инструмента целесообразно определять на основе изучения зависимости интенсивности износа от условий резания. В случае, когда интенсивности износа в зонах нормального и катастрофического износов резко отличаются, необходимо указывать границу области нормального износа - $h_{кр}$. Для расчета стойкости инструмента и определения рациональных режимов резания необходимо изучение зависимости критического износа $h_{кр}$ от условий резания. Скорость резания, толщина срезаемого слоя и прочностные характеристики обрабатываемого материала оказывают существенное влияние на величину $h_{кр}$. Случай, представленный на рисунке 4.4 а, имеет место при меньших скоростях, чем случай, иллюстрированный на рисунке 4.4 б.

Скорость резания, при которой выполняется равенство $h^* = h_{кр}$, назовем критической скоростью $V_{кр}$. Очевидно, что при заданных условиях резания и выбранном критерии затупления h^* скорость $V_{кр}$ является максимальной целесообразной скоростью резания.

Минимальной целесообразной скоростью резания обычно принято считать скорость V_0 , соответствующую максимальному пути резания или минимальной интенсивности износа режущего инструмента. Для обработки конструкционных сталей твердосплавными резцами режимы минимальных целесообразных скоростей или максимального пути резания не характерны в связи с их низкой производительностью.

В качестве характеристик обрабатываемости при точении обычно используется скорости резания V_{60} и V_{20} , соответствующие шестидесятиминутной и двадцатиминутной скоростям.

Скорости $V_{T=const}$ и $V_{\delta_L=const}$, соответствующие постоянным стойкости и интенсивности износа инструмента могут быть между собой связаны (например с помощью формулы 4.14). Скорости V_T и V_{δ_L} в различной степени зависят от

толщины срезаемого слоя, прочностных характеристик обрабатываемого материала (рис.4.6), следовательно не могут иметь одинаковых поправочных коэффициентов на измененные условия резания.

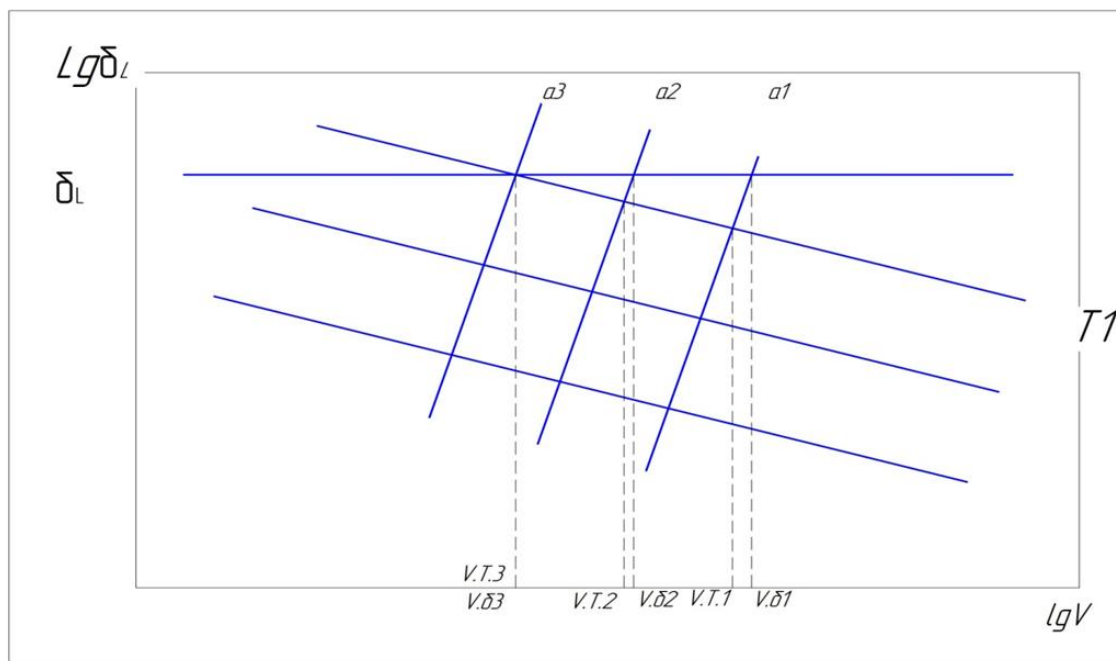


Рис.4.6. Схема к выяснению соотношения V_T и V_{δ_L}

Поправочные коэффициенты на скорость V_{δ_L} вытекают из условий постоянства температур контактных поверхностей инструмента, или тесно связанных с ними комплексов. Скорость резания влияет на стойкость T не только через интенсивность износа, но и непосредственно через путь резания. Поэтому зависимость между скоростью V_T и условиями резания будет иной, чем для скорости V_δ .

При определении скорости резания по заданным критерию износа h^* и стойкости необходимо учитывать, что область режима резания может быть разбита на две: в первой скорость резания V_T определяется по критерию и интенсивности износа на задней поверхности инструмента, а во второй – по критерию и интенсивности износа передней поверхности. Толщину среза, разделяющую эти зоны назовем $a_{кр}$.

В соответствии с выше изложенным, связь между стойкостью T и скоростью резания в различных областях условий резания будет описываться различными формулами

$$T = \begin{cases} \frac{h^* - h_0}{\delta_{L3} \cdot V} & \text{при } h_{кр} > h^* \\ \frac{h_{кр} - h_0}{\delta_{L3} \cdot V} & \text{при } h_{кр} < h^* \\ \frac{h_n^*}{\delta_{Ln}} & \text{при } a > a_{кр} \end{cases} a < a_{кр} . \quad (4.17)$$

В первой области при тонких срезах ($a < a_{кр}$) и малых скоростях резания ($V < V_{кр}$) стойкость зависит только от двух факторов: от интенсивности износа по задней грани и непосредственно от скорости. При скоростях резания $V < V_{кр}$ на стойкость оказывает влияние уменьшение критического износа $h_{кр}$ с ростом скорости резания. Поэтому зависимость стойкости T от скорости резания V при $a < a_{кр}$ будет иметь вид ломаной линии, обозначенной цифрами 1-2 (рис. 4.7). Более пологий участок 1 соответствует скоростям, меньшим чем $V_{кр}$. Увеличение крутизны линии $T-V$ на участке 2 является следствием уменьшения критического износа $h_{кр}$ с ростом скорости резания (инструмент работает в зоне катастрофического износа $h_{кр} < h^*$).

Третья формула, описывающая зависимость стойкости T от скорости резания при толстых срезах, представлена на рис. 4.7 в логарифмических координатах прямой 3. При тонких срезах износ по передней поверхности не ограничивает выбора скорости V_m (рис. 4.7а), однако при толстых срезах (рис. 4.7 б) он становится определяющим [41].

Линия 2 представляет собой геометрическое место точек $(V_{кр}, T_{кр})$ при изменении h^* . При постоянном заданном критерии затупления h^* из всей линии 2 представляет критический интерес лишь одна точка $(V_{кр}, T_{кр})$.

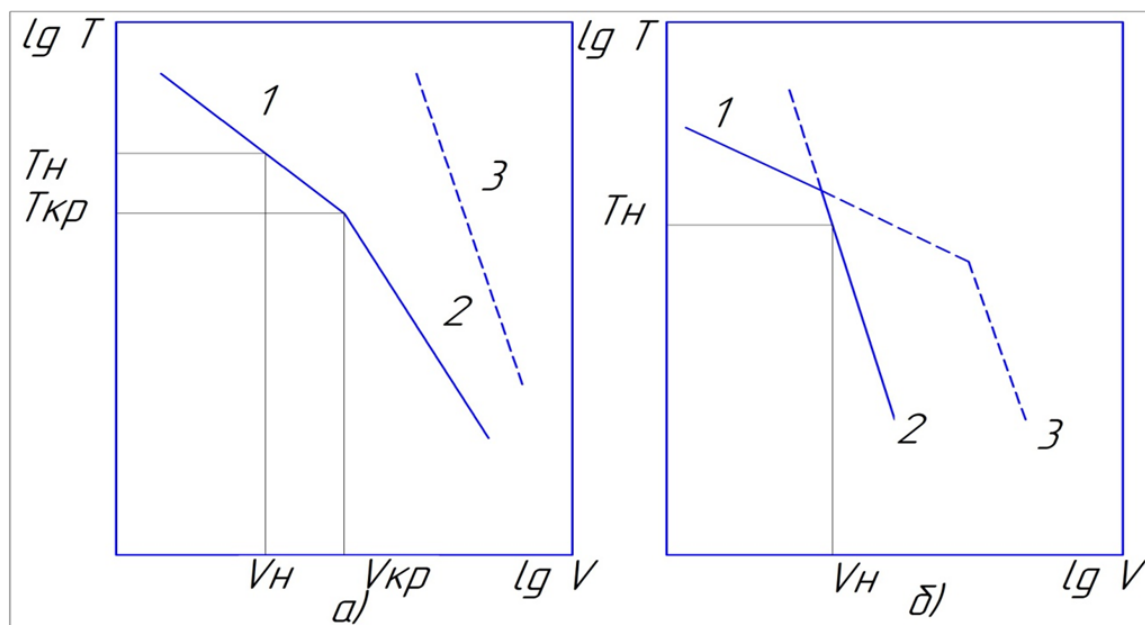


Рис. 4.7. Схема к анализу структуры зависимостей «стойкость-скорость»

4.5 Теоретическое обоснование зависимости критического износа от условий резания

Из экспериментальных исследований известно, что при достижении некоторого критического износа $h_{кр}$ (см. рис.4.4) происходит резкое увеличение интенсивности износа режущего инструмента. Опыты показывают, что значения $h_{кр}$ для одного и того же инструмента зависят от режимов резания. Наблюдения за состоянием режущего клина в процессе работы, а также анализ условий его теплового и механического нагружений на различных стадиях износа позволили выдвинуть гипотезу: резкое увеличение интенсивности износа наступает в тот момент, когда исчерпан запас прочности режущего клина. Иными словами, катастрофический износ наступает при том значении износа $h=h_{кр}$, которое за счет возросших температуры и нагрузки вызывает пластическую деформацию режущего клина. С целью проверки выдвинутой гипотезы и выяснения факторов, определяющих критические значения износа, в настоящей работе предпринят расчет режущего клина на прочность при различных режимах резания.

Один цикл расчета содержит следующие основные этапы:

1. Определение внешних нагрузок на режущий клин при износе h ;
2. Расчет напряжений $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ на передней и задней гранях клина;
3. Расчет локальных температур на передней и задней гранях;
4. Расчет эквивалентных напряжений на гранях клина;
5. Сравнение эквивалентных и допустимых напряжений в ряде точек передней и задней грани (определение локальных запасов прочности).

При этом считается, что допустимое напряжение при растяжении σ_p инструментального материала зависит от температуры, которая определяется на этапе 3.

Если локальный запас прочности $\frac{\sigma_p}{\sigma_{экв}}$ всюду больше 1, то износ h увеличивается на Δh и расчет повторяется. Если же для какой либо точки $\frac{\sigma_p}{\sigma_{экв}} \leq 1$, то расчет для данного режима заканчивается и на печать выводиться значение критического износа $h=h_{кр}$.

Основные расчетные зависимости.

Этап 1. Расчет внешних нагрузок на режущий клин.

Исходные данные.

Обрабатываемый материал: S_g – действительный предел прочности (кг/мм^2), C_V –объемная теплоемкость ($\text{кг мм/мм}^3 \text{ град}$), ω – коэффициент температуропроводности ($\text{м}^2/\text{с}$).

Инструментальный материал: $\sigma_p = \sigma_p(I)$, $\sigma_{сж} = \sigma_{сж}(I)$ – зависимости разрушающих напряжений при растяжении и сжатии от температуры.

Режущий клин: γ, α - передний и задний углы, соответственно.

Режим обработки: a – толщина среза (мм), V – скорость резания (м/мин).

В основу системы расчета внешних нагрузок положены результаты работ [69,121] и классические соотношения теории резания. Порядок расчета и формулы приведены в таблице 4.1.

Табл. 4.1. Расчет нагрузок на режущий клин

№ п/п	Наименование рассчитываемых параметров	Расчетные формулы
1	2	3
1.	Критерий Пекле	$P_e = Va/6\omega$
2.	Факторы X_i (i=1,2,3)	$X_1 = \frac{S_B}{C_v} \sqrt{P_e} \cdot 10^{-3},$ $X_2 = \frac{S_B}{C_v} (1 - \sin \gamma) \cdot 10^{-3},$ $X_3 = X_1/X_2.$
3.	Относительная длина контакта стружки с резцом (значения K_m см./12, стр. 40/)	$\frac{c}{a} = K_m \exp(-1.9X_1 + 5.9X_2 + 0.157X_3)$
4.	Усадка стружки (C_m см. /12, стр. 40/)	$\xi = \sqrt{1 + C_m \exp(-2.96 X_1 + 10.5X_2 + 0.218X_3)}$
5.	Угол β наклона условной плоскости сдвига к вектору скорости резания	$\beta = \arctg \frac{\cos \gamma}{\varepsilon - \sin \gamma}$
6.	Средняя температура \bar{U}_δ и касательное напряжение τ в условной плоскости сдвига	$\left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_\delta = \frac{\tau}{C_v} \frac{\varepsilon + \frac{1}{\varepsilon} - 2\sin \gamma}{\cos \gamma} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon - \sin \gamma}{P_e \cos \gamma}} \\ \tau = S_v(1 - 0.5 \cdot 10^{-3} \bar{U}_\delta) \end{array} \right\}$
7.	Средняя температура U_{n2} и наибольшее касательное напряжение q_F на передней грани резца.	$\bar{U}_{n2} = \bar{U}_\delta + 0.56 \frac{q_F}{C_v} \sqrt{\frac{Pe}{\varepsilon} \cdot \frac{c}{a}}$ $q_F = S_B(1 - 0.5 \cdot 10^{-3} \bar{U}_{n2})$
8.	Средние касательные \bar{q}_F и \bar{q}_N нормальные напряжения на передней грани.	$\bar{q}_F = 0.687 q_F, \bar{q}_N =$ $= \bar{q}_F \left[\tan(\beta - \gamma) + \frac{\frac{\tau}{q_F}}{\frac{c}{a} \sin \beta \cos(\beta - \gamma)} \right]$

9.	Средняя температура задней грани от тепла основной деформации срезаемого металла.	$\bar{U}'_{\partial} = \bar{U}_{\partial} \frac{1.54}{Z} [1 - \exp(-0,65Z)],$ $Z = \frac{hv}{\omega} \left(\frac{\cos \gamma}{\xi} \right)^2$
10.	Средняя температура \bar{U}_{32} и наибольшее касательное напряжение q'_F на задней грани резца.	$\bar{U}_{32} = \bar{U}'_{\partial} + 0.6 \frac{q_F}{C_V} \sqrt{\frac{vh}{\omega}}$ $q'_F = \sigma_B (1 - 0.5 \cdot 10^{-3} \bar{U}_{32})$
11.	Средние касательные и нормальные напряжения на задней грани.	$\overline{q'_F} = 0.75 q'_F, \overline{q'_N} = 1.7 \overline{q'_F}$

Этап 2. Расчет напряжений на гранях клина.

Принятые допущения:

1. Процесс резания и напряженное состояние клина – плоские.
2. Нагрузки, действующие на грани клина подчиняются следующим законам:

$$q_N(r) = -2.7 \overline{q_N} \exp[-5.8 \left(\frac{r}{c}\right)^2], \quad (4.18)$$

$$q'_N(r) = -1.9 \overline{q'_N} \exp[-2.5 \left(\frac{r}{c}\right)^2], \quad (4.19)$$

$$q_F(r) = \begin{cases} 1.45 \overline{q_F} \frac{r}{c} < 0,375, \\ 2.32 \overline{q_F} \left(1 - \frac{r}{c}\right) \frac{r}{c} \in [0,375; 1] \\ 0 & \frac{r}{c} > 1. \end{cases} \quad (4.20)$$

$$q'_F(r) = \begin{cases} -1.33 \overline{q'_F} \frac{r}{h} < 0,5, \\ -2.66 \overline{q'_F} \left(1 - \frac{r}{h}\right) \frac{r}{h} \in [0,5; 1] \\ 0 & \frac{r}{h} > 1. \end{cases} \quad (4.21)$$

3. При изменении режимов резания меняются только средние нагрузки, законы распределения нагрузок не меняются.

4. Увеличение ширины фаски износа влияет на максимальные напряжения в клине, главным образом через изменение длины контакта и нагрузки по задней грани, но не через изменение формы режущего клина в результате износа. Иными словами, напряжения рассчитываются для клина правильной формы (без фаски по задней грани), к которому приложен нагрузки, действующие на изношенный инструмент.

5. Режущая пластина достаточно толстая и влияние толщины на прочность можно не учитывать, т.е. клин считается бесконечным.

6. Процесс резания установившийся. Температурные напряжения в клине отсутствуют.

Используя принцип суперпозиции и решения, полученные в работе [121], рассчитывались напряжения $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ на передней и задней гранях клина.

Этап 3. Расчет локальных температур:

- на передней грани:

$$U_{(r)} = \bar{U}_\partial + 0.66 \frac{q_F}{c_V} \sqrt{\frac{vc}{\omega \xi}} \tau_3 \left(\frac{r}{c} \right), \quad (4.22)$$

где

$$\tau_3 \left(\frac{r}{c} \right) = (2.14 - 1.47 \frac{r}{c}) \sqrt{\frac{r}{c}}; \quad (4.23)$$

- на задней грани:

$$U'_{(r)} = U'_\partial + 0.72 \frac{q'_F}{c_V} \sqrt{\frac{vh}{\omega}} \tau_3 \left(\frac{r}{h} \right), \quad (4.24)$$

где

$$U'_\partial = \bar{U}_\partial \exp \left[-0.65 \frac{vr}{\omega} \left(\frac{\cos \gamma}{\xi} \right)^2 \right]. \quad (4.25)$$

Этап 4. Расчет эквивалентных напряжений.

$$\sigma_{\text{экв}} = X\sigma_i + (1 - X)\sigma_1 A^{1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}}, \quad (4.26)$$

где

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (4.27)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения,

$$X = \sigma_p(U) / \sigma_{\text{сж}}(U), \quad (4.28)$$

A – константа материала.

Для твердого сплава Т5К10 принято (16, с.104):

$$\sigma_{\text{сж}} = 428,31 - 0,268708U - 0,000106U^2, \quad (4.29)$$

где U – температура в градусах Цельсия.

$$\sigma_p = 62,851 + 0,006399U - 0,000037U^2, \quad (4.30)$$

$$X = 0,146743 + 0,000107U. \quad A = 0,75. \quad (4.31)$$

Этап 5. Определение локальных запасов прочности.

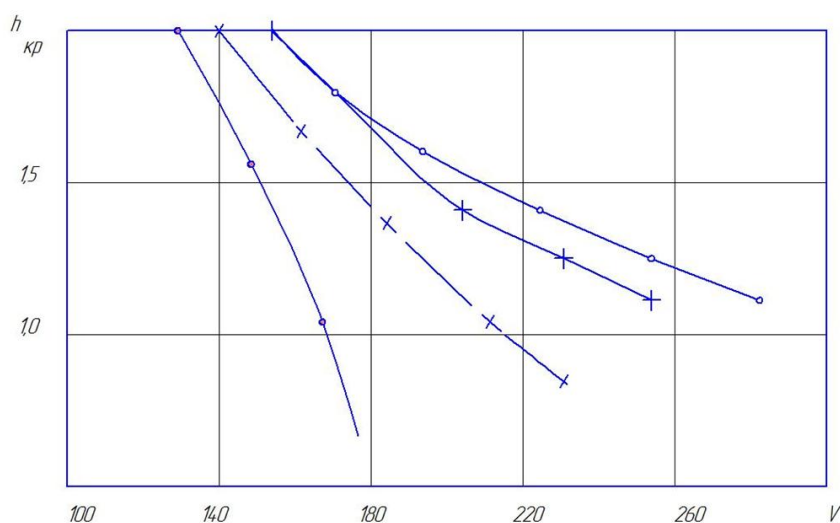
$$K = \frac{\sigma_p(U)}{\sigma_{\text{экв}}}. \quad (4.32)$$

По описанной методике были выполнены расчеты критических износов при обработке стали 18ХГТ инструментом из твердого сплава Т5К10 ($\gamma = 10^\circ, \alpha = 8^\circ$) на различных режимах. Результаты расчета представлены на рисунках 4.8; 4.9.

Полученные расчетом значения $h_{\text{кр}}$ по порядку величин и характеру изменения совпадают с экспериментальными данными. Это подтверждает гипотезу о том, что причиной, обуславливающей наступление критических износов, является потеря прочности режущего инструмента.

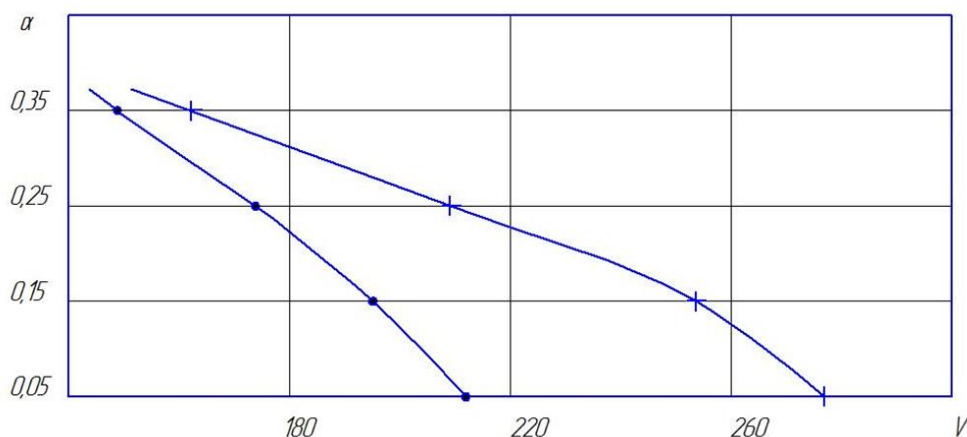
Величина критического износа $h_{\text{кр}}$ уменьшается с ростом скорости резания V и увеличением толщины a срезаемого слоя. При тонких срезах зависимость $h_{\text{кр}}$ от V имеет пологий характер, с увеличением толщины среза скорость резания оказывает на $h_{\text{кр}}$ более сильное влияние (рис.4.8).

Установлено, что положение границы, разделяющей зоны катастрофического и нормального износов, определяются механическими нагрузками и температурами на контактных поверхностях инструмента.



о – $a = 0,05$ мм, + – $a = 0,15$ мм, X – $a = 0,25$ мм, • – $a = 0,35$ мм.

Рис..4.8. Зависимость критических износов $h_{\text{кр}}$ (мм) от скорости резания V (м/мин) при различных толщинах реза



• - $h_{кр} = 1,5$ мм, + - $h_{кр} = 1,1$ мм.

Рис. 4.9. Зависимость предельных толщин среза α (мм) от скорости резания V (м/мин) при различных критериях затупления по задней грани

4.6 Экспериментальные исследования зависимости критического износа и интенсивности износа от условий резания

Анализ кривых (рис. 4.10; 4.11), выражающих зависимость износа h по задней поверхности инструмента от пути резания L , полученных при обработке стали 18ХГТ (НВ=150) и стали 45 (НВ=167-177) резцом из сплавов Т5К10 позволил сделать следующие выводы.

Почти на всех режимах (за исключением малых скоростей и малых толщин срезаемого слоя) имеет место четкий переход от зоны нормального к зоне катастрофического износа, характеризующейся резким увеличением (на порядок) интенсивности износа δ_L при небольшом изменении износа h в окрестности $h_{кр}$. Это свидетельствует о качественных изменениях механизма износа инструмента, связанных, по-видимому, с потерей прочности инструмента при достижении достаточно высоких температур его контактных поверхностей.

Зависимости $h_{кр}$ от скорости резания имеет пологий характер при тонких срезах и крутой при увеличении толщины срезаемого слоя. Допуская, что условия пластической прочности режущего инструмента зависит в основном от температур контактных поверхностей, представим это условие

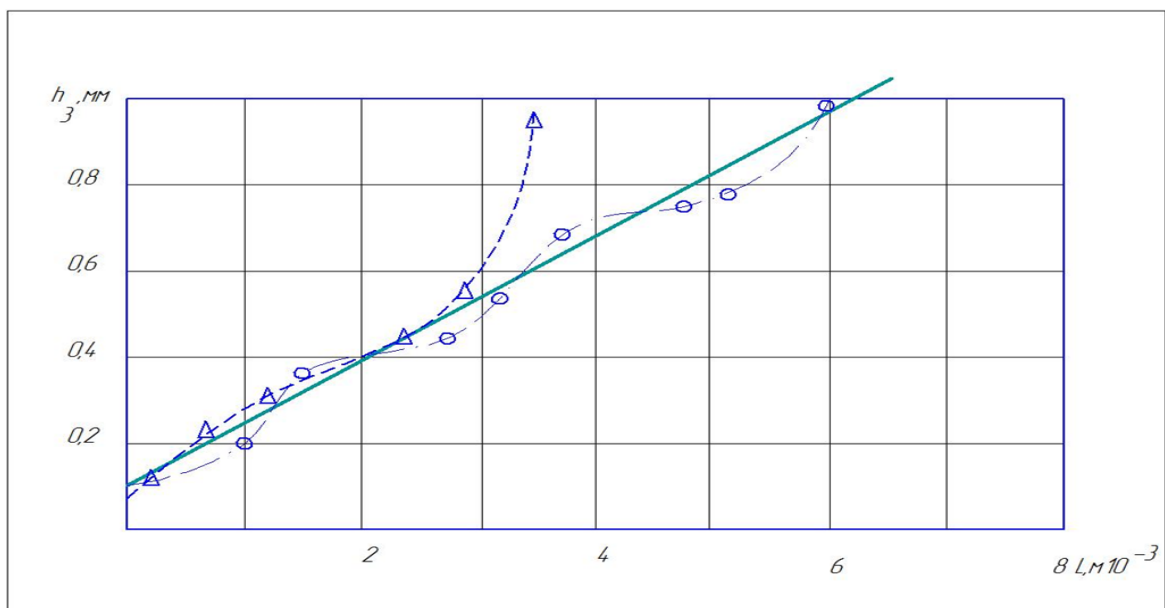
единой кривой в координатах «температура передней поверхности – температура задней поверхности» или для конкретного инструмента в координатах близких к температурам контактных поверхностей комплексов X_1 и X_2

$$X_1 = \frac{S_B}{C_v} \sqrt{\frac{Va}{\omega}} = \frac{0,95 \cdot \frac{HB}{3} (1 + \frac{\delta}{100})}{C_v} \cdot \sqrt{\frac{Va}{\omega}}, \quad (4.33)$$

$$X_2 = \frac{HB}{C_v} \sqrt{\frac{Vh_{kp}}{\omega}}. \quad (4.34)$$

Здесь средняя толщина среза a определена формулой

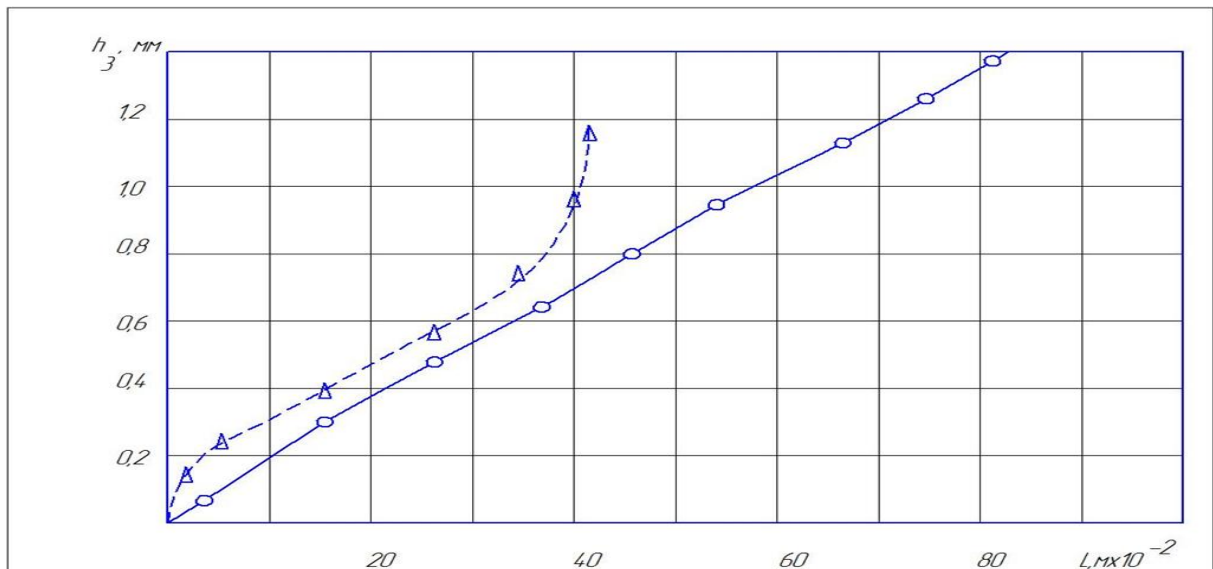
$$a = \frac{S}{\sqrt{1 + (\frac{S}{t} + ctg\varphi)^2}}. \quad (4.35)$$



Сталь 18ХГТ НВ150 $T_{5K10\varphi} = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$ $\gamma = 10^\circ$; $R = 65$ мм;

$t = 1,5$; $S = 0,3 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $v = 250 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $\Delta - v = 350 \text{ м/мин}$

Рис. 4.10. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания

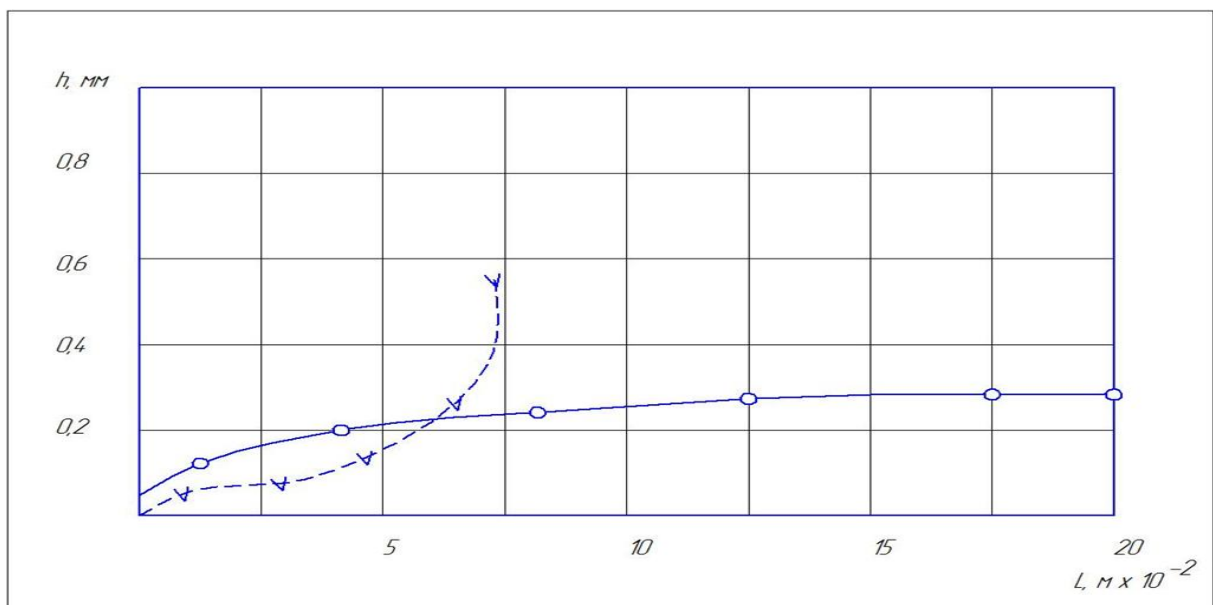


Сталь 18ХГТ HB150 T5K10 $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$

$\gamma = 10^\circ$; $R = 65 \text{ мм}$; $c = 1,0 \text{ мм}$; $t = 1,5$; $S = 0,07 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$;

$o - v = 250 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$ $\Delta - v = 350 \text{ м/мин.}$

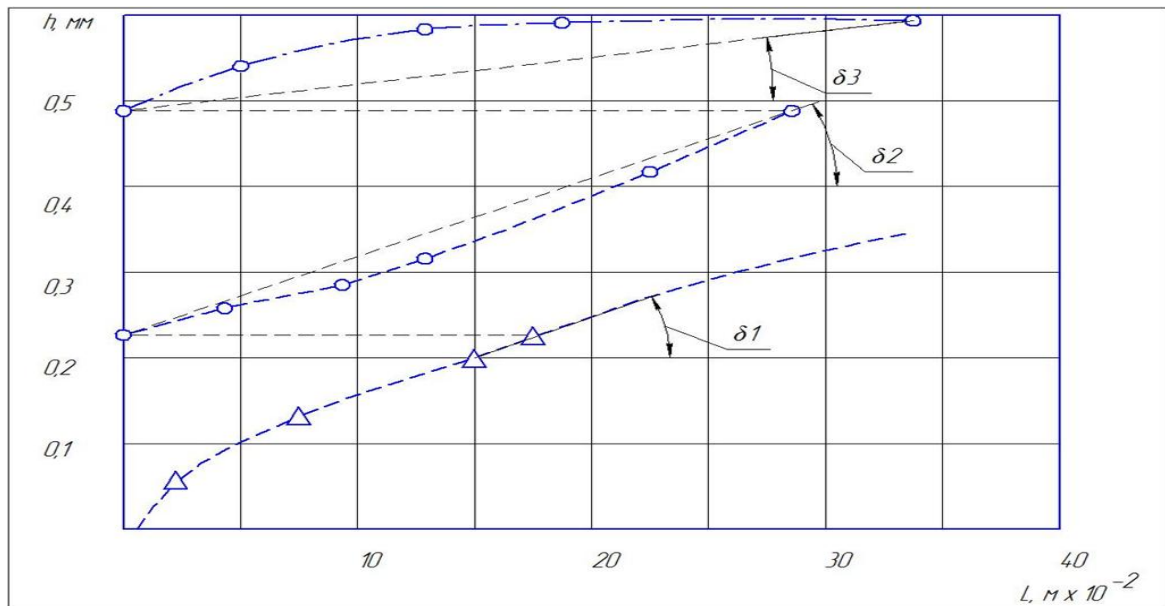
Рис. 4.11. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания



Сталь 18ХГТ HB150 T5K10 $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$; $\gamma = 10^\circ$; $R = 65 \text{ мм}$;

$c = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1,5 \text{ мм}$; $S = 1,6 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$ $V - v = 150 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$ $o - v = 100 \text{ м/мин}$

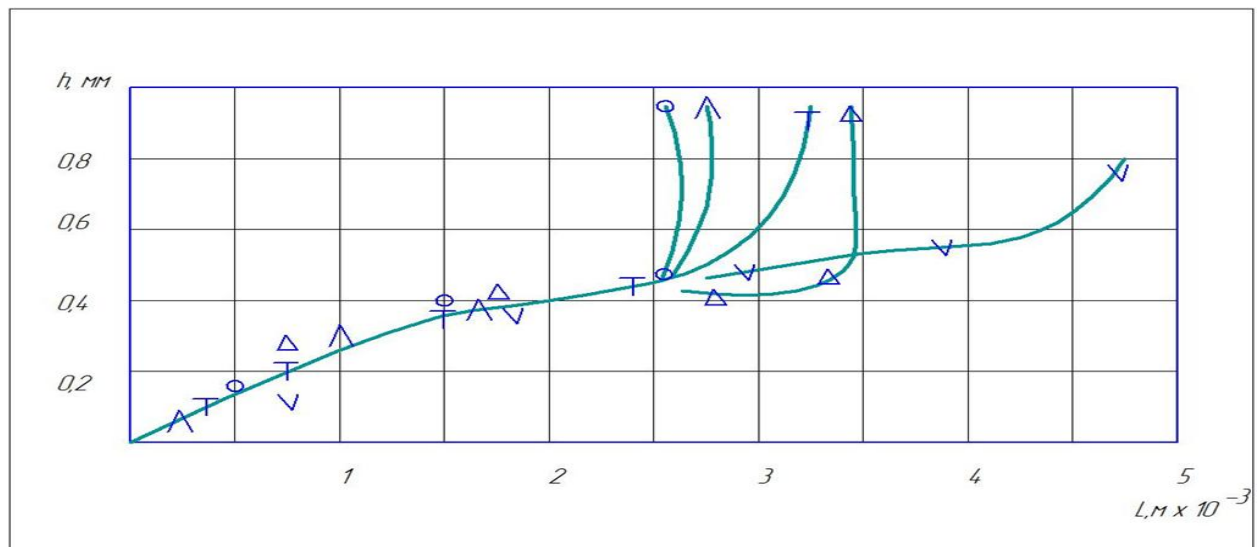
Рис. 4.12. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания



Сталь 18ХГТ НВ150 Т5К10 $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$; $\gamma = 10^\circ$;

$R = 65 \text{ мм}$; $c = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1,5 \text{ мм}$; $S = 0,78 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $\delta = \arctg \delta_L$

Рис. 4.13. Зависимость износа от пути резания при ступенчатом изменении скорости резания.

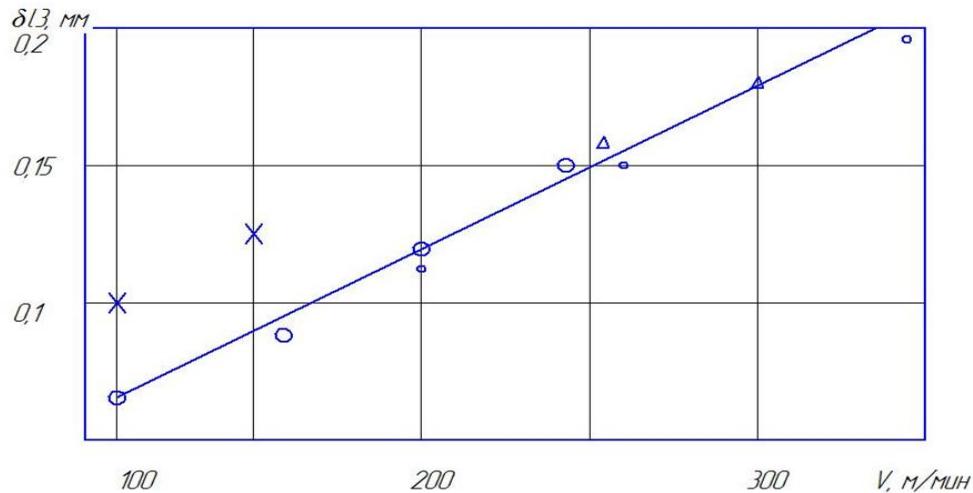


$\Delta - v = 200 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$ $o - v = 165 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$ $T - v = 100 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $V = 300 \text{ м/мин}$;

$S = 0,3 \text{ мм/об}$; 18ХГТ, НВ150, Т5К10;

$\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$; $\gamma = 10^\circ$; $R = 65 \text{ мм}$; $c = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1,5 \text{ мм}$

Рис. 4.14. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания при повторении опытов в одинаковых условиях



Сталь 18ХГТ, НВ150, Т5К10; $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$; $\gamma = 10^\circ$; $R = 65 \text{ мм}$;

$$c = 1,5 \text{ мм}; \quad t = 1,5 \text{ мм}; \quad X - S = 1,56 \frac{\text{мм}}{\text{об}};$$

$$\square - S = 0,78 \frac{\text{мм}}{\text{об}}; \quad \Delta - S = 0,3 \frac{\text{мм}}{\text{об}}; \quad o - S = 0,07 \frac{\text{мм}}{\text{об}}.$$

Рис. 4.15. Зависимость интенсивности износа по задней поверхности от скорости резания при заданных подачах.

Для конкретного обрабатываемого материала комплексы X_1 и X_2 могут быть заменены более простыми «Va» и «Vh». На рис. 4.21 представлена зависимость «Va - Vh_{кр}», полученная для стали 18ХГТ с твердостью НВ = 150 кг/мм² и действительным пределом прочности $S_B = 60 \text{ кг/мм}^2$. Отрезки на осях $(Va)_{\max} = K'_1 = 0,11 \text{ м}^2/\text{мин}$, $(Vh_{\text{кр}})_{\max} = K'_2 = 0,28 \text{ м}^2/\text{мин}$. Аппроксимируя зависимость Va - Vh_{кр} эллипсом, получим для h_{кр} следующую формулу

$$h_{\text{кр}} \cdot 10^{-3} = \frac{K'_2}{V} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{Va \cdot 10^{-3}}{K'_1} \right)^2}. \quad (4.36)$$

Полагая в первом приближении для одной группы сталей на ферритной основе теплофизические характеристики (коэффициент объемной теплоемкости C_v и коэффициент температуропроводности $\omega = \frac{\lambda}{c_v}$, где λ – коэффициент теплопроводности) постоянными, на основании выражений заменим K'_1 и K'_2 более общими факторами K_1 и K_2

$$K_1 = K'_1 \cdot \left(\frac{60}{S_6}\right)^2 = 0.11 \left(\frac{60}{S_6}\right)^2 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad (4.37)$$

$$K_2 = K'_2 \cdot \left(\frac{150}{HB}\right)^2 = 0.28 \left(\frac{150}{HB}\right)^2 \text{ м}^2/\text{мин} . \quad (4.38)$$

Для стали 45 с твердостью $HB=167-177$ и действительным пределом прочности $S_B=660$ Мпа, $K_1 = 0.09 \frac{\text{м}^2}{\text{мин}}$, $K_2 = 0.215 \text{ м}^2/\text{мин}$.

Интенсивность износа δ_{L3} задней поверхности (рис. 4.13) при различных подачах ($S=0.07-1.6$ мм/об) оказалась зависящей только от скорости резания, что, очевидно, является следствием преимущественного влияния на интенсивность износа температуры на задней поверхности инструмента. В связи с этим учет поправки на твердость HB , вытекающей из (4.33 – 4.34), зависимость интенсивности δ_L от скорости резания и твердости, представленная на рис. 4.13, может быть аппроксимирована формулой:

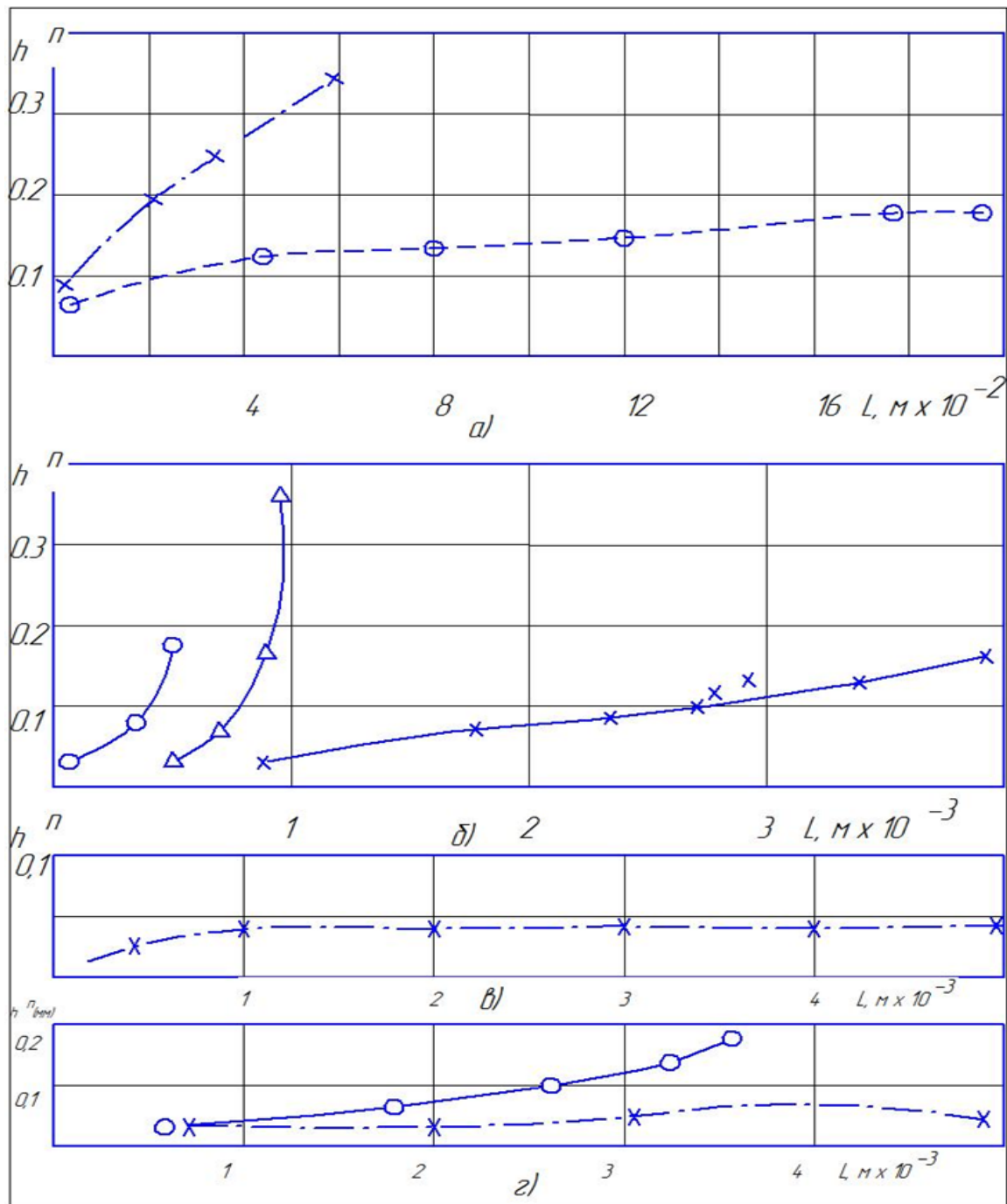
$$\delta_{L3} = 0.2 \left(\frac{V}{350}\right) \left(\frac{HB}{150}\right)^2 \cdot 10^{-6} . \quad (4.39)$$

Интенсивность δ_{Ln} износа передней поверхности по предположению связана преимущественно с температурой передней поверхности или, соответственно с факторами Va и $\frac{S_B}{C_v} \sqrt{\frac{Va}{\omega}}$. Представленная на рис. 4.18 экспериментальная зависимость δ_{Ln} от (Va) , полученная для стали 18ХГТ, может быть аппроксимирована функцией вида

$$\delta_{Ln} = 0.17 \left(\frac{Va \cdot 10^{-3}}{K_1}\right)^3 \cdot 10^{-6}, \quad (4.40)$$

или с учетом (3-1)

$$\delta_{Ln} = 0.17 \left(\frac{Va \cdot 10^{-3}}{0.11}\right)^3 \left(\frac{S_B}{60}\right)^6 \cdot 10^{-6}. \quad (4.41)$$



Сталь 18ХГС, НВ150, Т5К10; $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$

$\gamma = 10^\circ$; $R = 65 \text{ мм}$; $c = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1,5 \text{ мм}$;

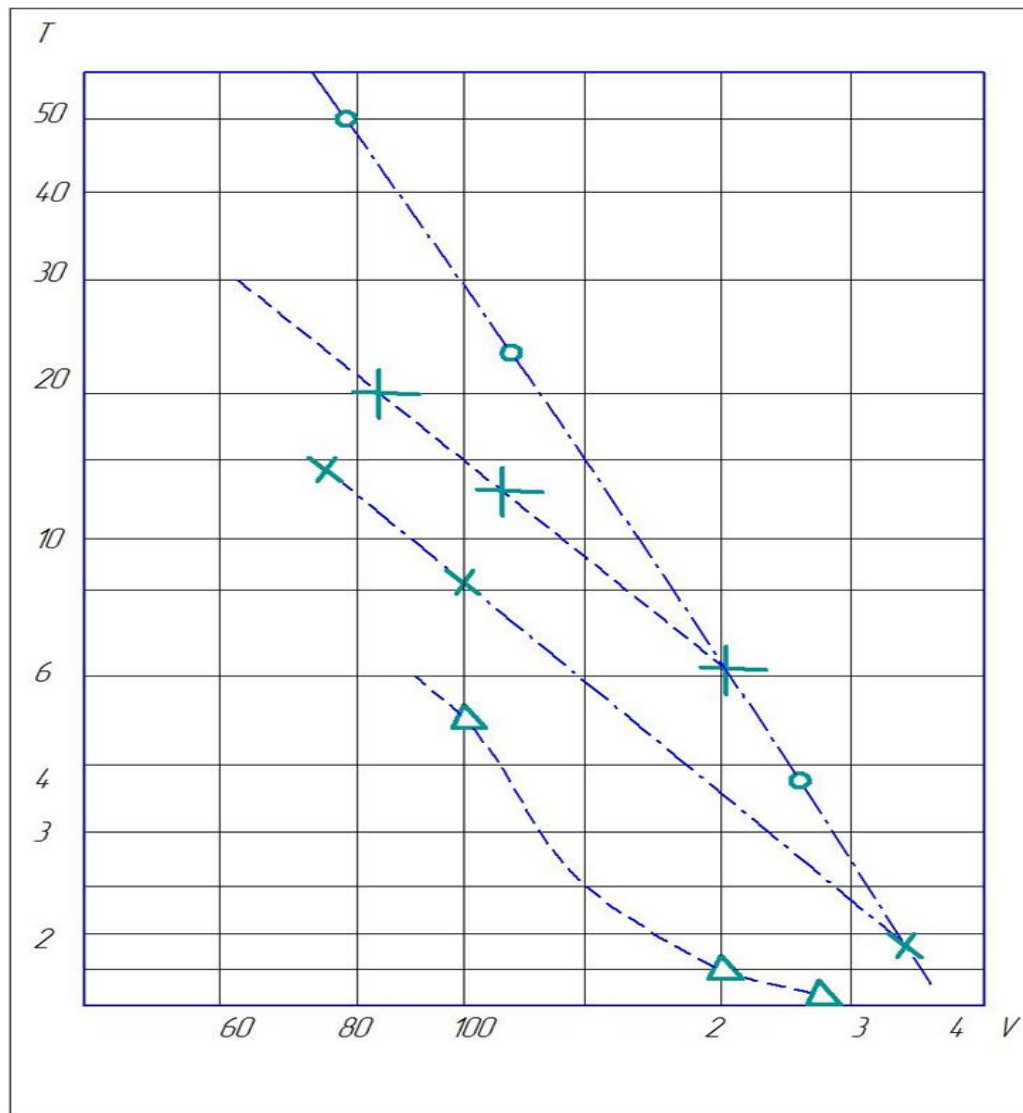
а) $S = 1,56 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $X - V = 150 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $o - V = 100 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$;

б) $S = 0,79 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $o - V = 270 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $\Delta - V = 240 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $X - V = 200 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$;

в) $S = 0,07 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $X - V = 350 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$;

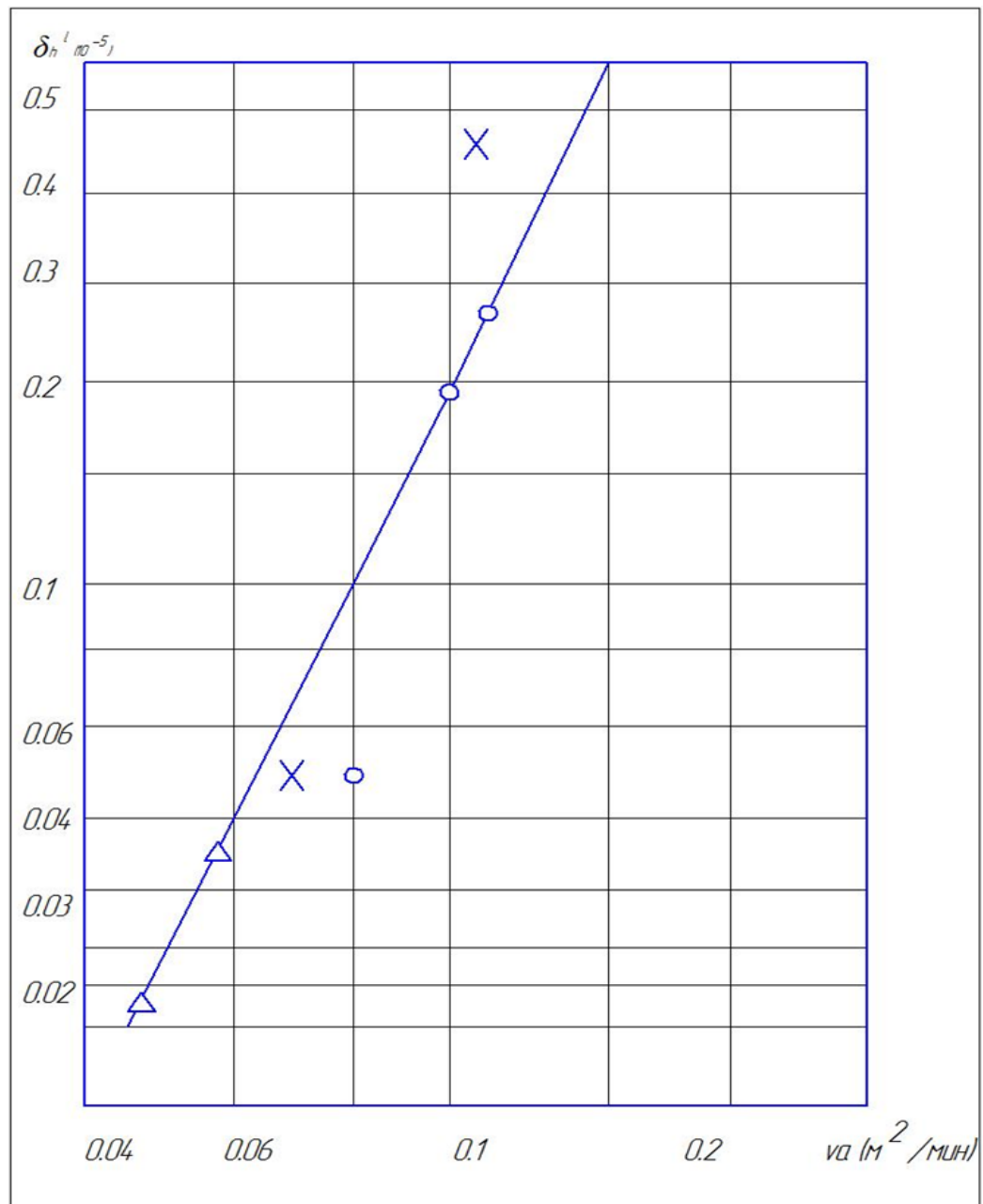
г) $S = 0,3 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $o - V = 300 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $X - V = 250 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$

Рис. 4.16. Зависимость износа (и опускания) по передней поверхности от пути



$O - h^* = h_{кр}$; $+$ - $h^* = 1,5$ мм; $X - h^* = 1,0$ мм; $\Delta - h^* = 0,6$ мм

Рис. 4.17. Зависимость стойкости от скорости при различных критериях затупления h^*

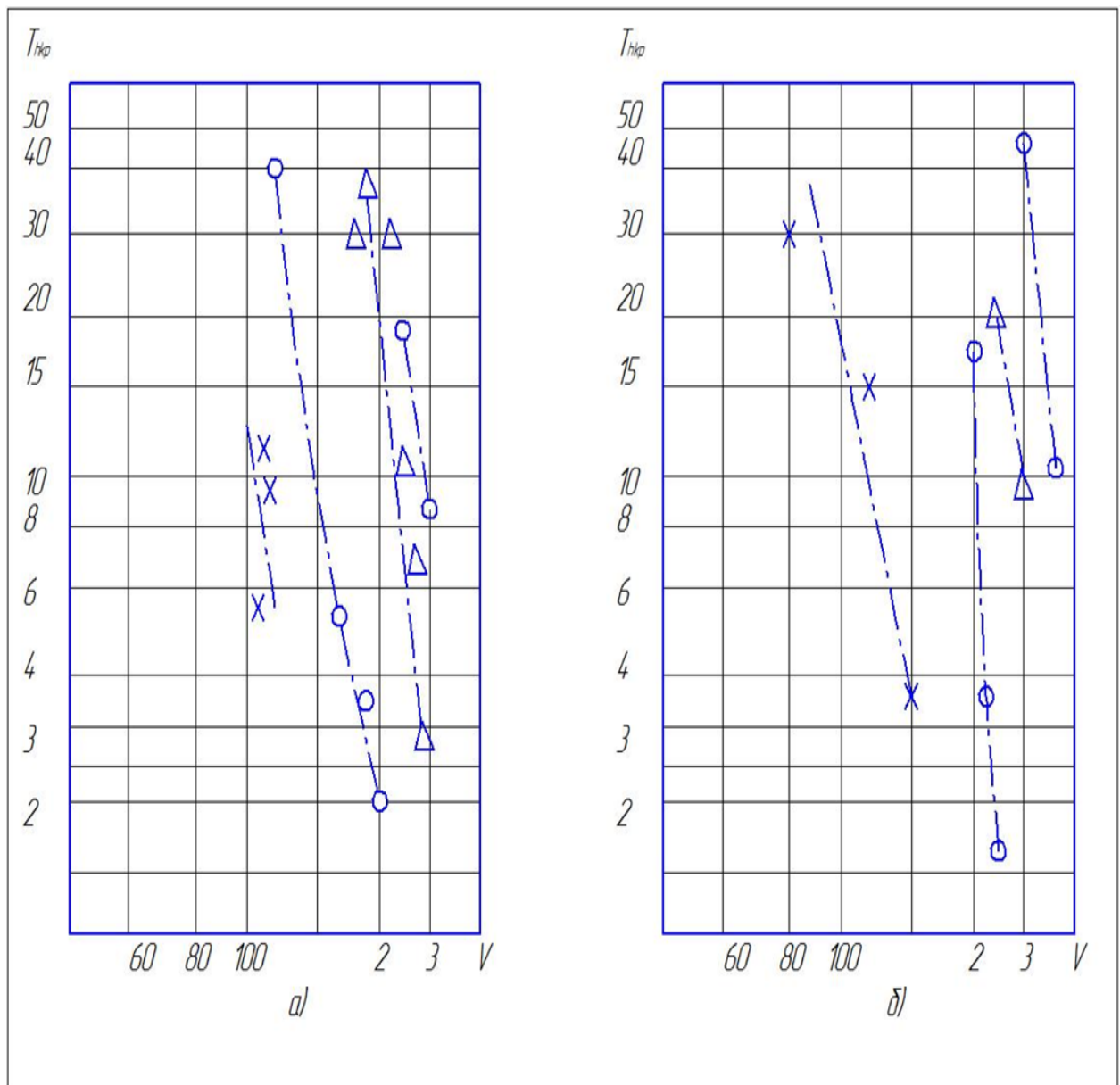


Сталь 18ХГС, НВ150; $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$;

$\gamma = 10^\circ$; $R = 65 \text{ мм}$; $c = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1,5 \text{ мм}$;

$X - S = 1,56 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $O - S = 0,78 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $\Delta - S = 0,3 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $o - S = 0,07 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$

Рис. 4.18. Зависимость интенсивности износа по передней поверхности от произведения скорости резания на толщину среза



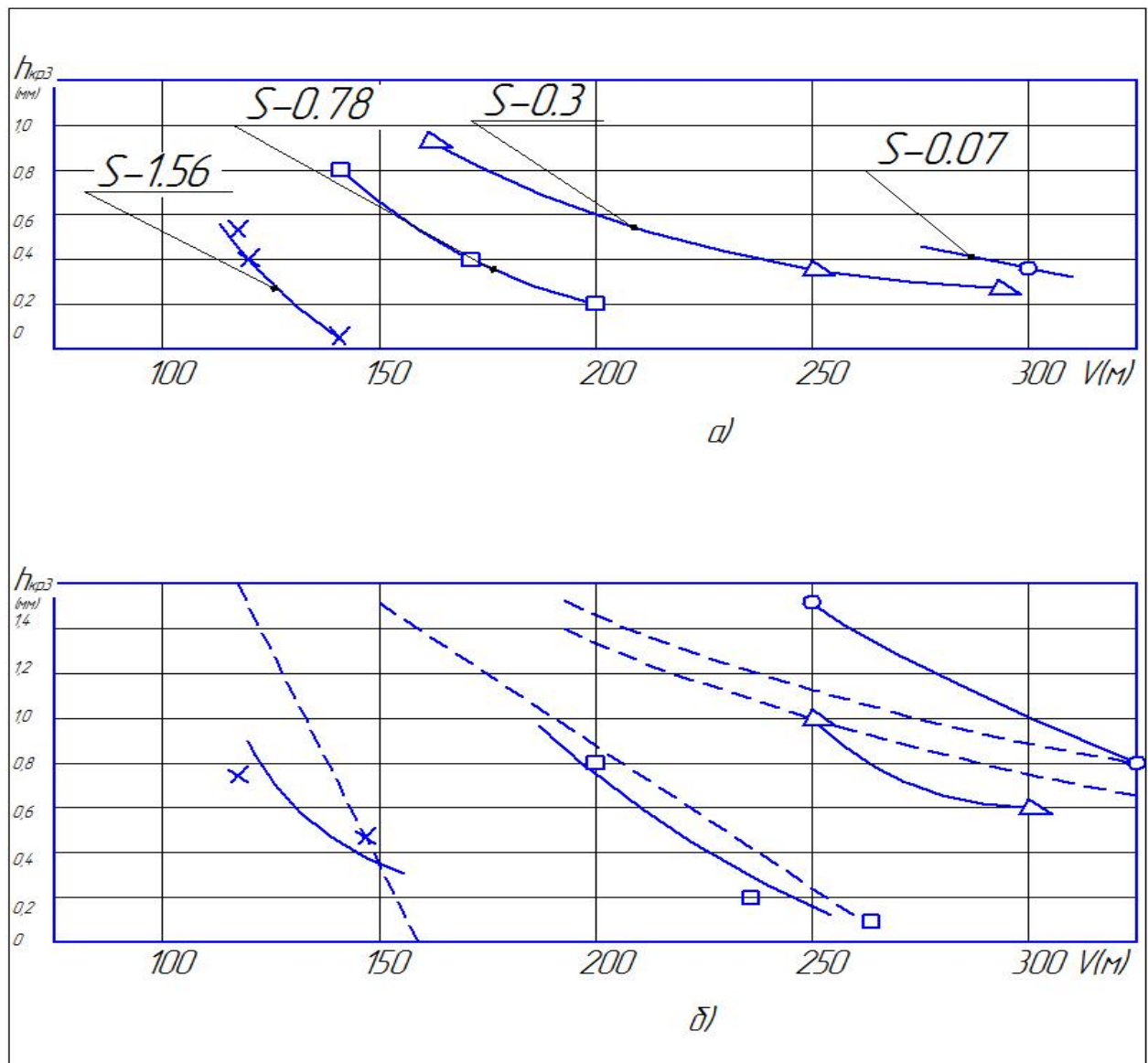
а) Сталь 45, HB167 – 177

б) сталь 18ХГТ, HB150, T5K10; $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$;

$\gamma = 10^\circ$; $R = 65 \text{ мм}$; $c = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1,5 \text{ мм}$;

$X - S = 1,56 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $O - S = 0,78 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $\Delta - S = 0,3 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $o - S = 0,07 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$.

Рис. 4.19. Зависимость стойкости



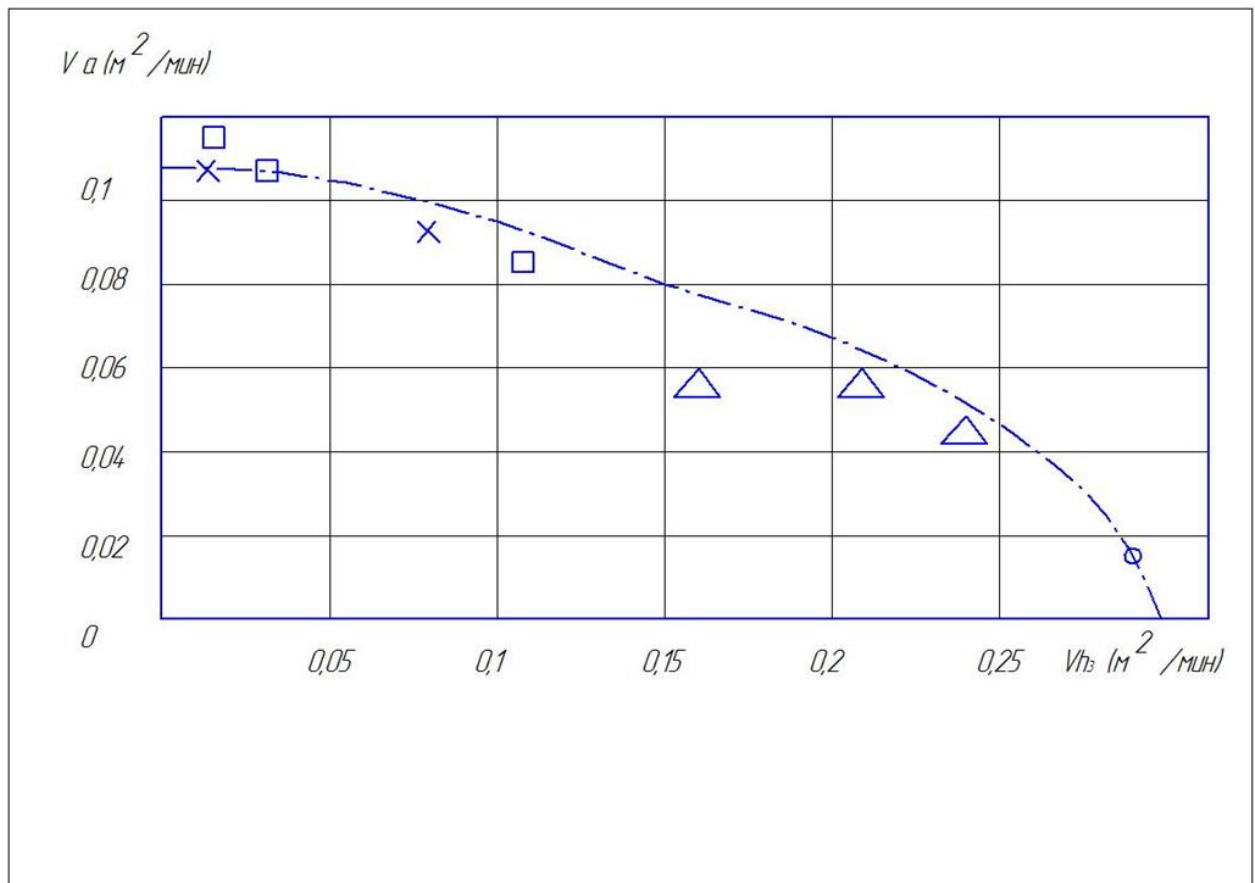
а) Сталь 45, HB167 – 177.

б) Сталь 18ХГТ, HB150, T5K10; $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$;

$\gamma = 10^\circ$; $R = 65$ мм; $c = 1,5$ мм; $t = 1,5$ мм;

$X - S = 1,56 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $O - S = 0,78 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $\Delta - S = 0,3 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $o - S = 0,07 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$.

Рис. 4.20. Зависимость критического износа по задней поверхности от скорости резания



Сталь 18ХГТ, НВ150, Т5К10; $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 4^\circ 30'$;

$\gamma = 10^\circ$; $R = 65$ мм; $c = 1,5$ мм; $t = 1,5$ мм;

$X - S = 1,56 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $\square - S = 0,48 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $\Delta - S = 0,3 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $o - S = 0,07 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$.

Рис. 4.21. Зависимость произведения скорости на толщину среза от произведения скорости на критический износ по задней поверхности

4.7 Определение скорости резания по стойкости и критерию затупления

4.7.1 Расчет скорости резания по интенсивности износа и критерию затупления.

Согласно результатам п. 4.1 и п. 4.3 при тонких срезах ($a < a_{кр}$) и малых скоростях резания ($V < V_{кр}$), соответствующих работе инструмента в зоне нормального износа ($h^* < h_{кр}$), скорость резания V_m , соответствующая

заданной стойкости T , может быть определена по величине критерия затупления h^* и интенсивности износа δ_{L3} задней поверхности из соотношения

$$V_T = \frac{(h^* - h_0)10^{-3}}{\delta_{L3} \cdot T} = \frac{(h^* - h_0)10^3}{0.2 \left(\frac{V_T}{350}\right) \left(\frac{HB}{150}\right)^2 T}, \quad \begin{matrix} V \leq V_{kp} \\ a < a_{kp} \end{matrix} \quad (4.42)$$

Разрешая (4.42) относительно V_m , находим

$$V_T = 2,5 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{h^* - h_0}{T} \cdot K_2} = \frac{1323}{\left(\frac{T}{h^* - h_0}\right)^{0.5} \left(\frac{HB}{150}\right)}, \quad \begin{matrix} V \leq V_{kp} \\ a < a_{kp} \end{matrix}, \quad (4.43)$$

где K_2 определяется формулами (4.41).

Область определения формулы (4.47) ограничивается тонкими срезами ($a < a_{kp}$) и скоростью V_{kp} , которая может быть определена из условий

$$h^* = h_0. \quad (4.44)$$

Из (4.48) с учетом формулы (4.39) следует

$$V_{kp} = \frac{10^3}{\sqrt{\left(\frac{h^*}{K_2}\right)^2 + \left(\frac{a}{K_1}\right)^2}}. \quad (4.45)$$

Скорости V_{kp} соответствует стойкость T_{kp} . При заданных критерии затупления h^* , толщине срезаемого слоя a и прочностных характеристиках обрабатываемого материала твердости НВ и относительного удлинения δ стойкость T_{kp} с учетом (4.15) и (4.16) может быть вычислена по формулам

$$T_{kp} = \begin{cases} 6.25 \cdot 10^6 \frac{(h^* - h_0)K_2}{V_{kp}^2} & \text{при } a \leq a_{kp}, \\ \left[\frac{1152}{V_{kp} \left(\frac{a}{K_1} \right)^{0.75}} \right]^4 & \text{при } a > a_{kp}. \end{cases} \quad (4.46)$$

Если a_{kp} неизвестна, то для стойкости T_{kp} выбирается меньшее из двух вычисленных по формулам (4.46) значений.

При толстых срезах ($a > a_{kp}$) скорость резания V_T определяется по интенсивности износа передней поверхности δ_{Ln} . Величину h_n^* на основании наших опытов условно примем равной 0.3 мм.

$$V_T = \frac{h_n^*}{\delta_{Ln} T} = \frac{0.3 \cdot 10^3}{0.17 \left(\frac{V_T a \cdot 10^{-3}}{0.11} \right)^3 \left(\frac{S_B}{60} \right)^6 T}. \quad (4.47)$$

Разрешая уравнение (4.47) относительно скорости V_T , получим

$$V_{mn} = \frac{220}{T^{0.25} a^{0.75} \left(\frac{S_B}{60} \right)^{1.5}} = \frac{1152}{T^{0.25} \left(\frac{a}{K_1} \right)^{0.75}}. \quad (4.48)$$

4.7.2 Расчет скорости резания

Для расчета скорости резания должны быть известны следующие исходные данные:

- прочностные характеристики обрабатываемой стали твердость HB и относительное удлинение δ при растяжении;
- сведения о наличии или отсутствии корки необрабатываемой поверхности;
- марка инструментального материала;
- главный угол резца в плане ϕ ;
- глубина резания t и подача S ;
- заданные стойкость T и критерий затупления h^* по задней поверхности.

Скорость V_T рассчитывается по формуле

$$V_T = V'_T K_K K_{II}, \quad (4.49)$$

где K_K и K_{II} – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние на скорость V_T наличие корки необрабатываемой поверхности и марки инструментального материала. (см.табл.4.2).

Табл. 4.2. K_K и K_{II} – поправочные коэффициенты.

Марка твердого сплава	Поправочный коэффициент K_{II} на марку инструмент.	Поправочный коэффициент на наличие корки
T5K10	1.0	0.8
T5K12B	1.0	0.9
T14K8	1.15	0.8
T15K6	1.4	0.8

Скорость V'_T может быть либо вычислена аналитически, либо определена с помощью таблиц.

Аналитически скорость V'_T вычисляется по одной из трех формул:

$$V'_T = \begin{cases} v_{кр} = \frac{10^3}{\sqrt{(\frac{h^*}{K_2})^2 + (\frac{a}{K_1})^2}} & \text{если } V_{кр} < V_{T3}, V_{ТП} \\ v_{T3} = \frac{1323}{\left(\frac{T}{h^* - h_0}\right)^{0.5} \left(\frac{HB}{150}\right)} & \text{если } V_{T3} < V_{кр}, V_{ТП} \\ v_{ТП} = \frac{1152}{T^{0.25} \left(\frac{a}{K_1}\right)^{0.75}} & \text{если } V_{ТП} < V_{кр}, V_{T3} \end{cases}. \quad (4.50)$$

где

$$a = \frac{s}{\sqrt{1 + \left(\frac{s}{t} + ctg\varphi\right)^2}}, \quad (4.51)$$

$$K_1 = 0.11 \left[\frac{60}{0.95 \frac{HB}{3} \left(1 + \frac{\delta}{100} \right)} \right]^2, \quad (4.52)$$

$$K_2 = 0.28 \left(\frac{150}{HB} \right)^2. \quad (4.53)$$

Примечание:

В случае, когда $V_{кр} < V_{ТЗ}, V_{ТП}$, целесообразно пересмотреть заданные стойкости Т и критерий затупления h^* и либо уменьшить h^* либо увеличить Т до выполнения условия

$$\frac{T}{h^* - h_0} = \left[\frac{1323}{\frac{HB}{150} v_{кр}} \right]^2, \quad (4.54)$$

С помощью таблиц скорость V_T' определяются через скорость V_{60} , соответствующую нормативной стойкости $T=60$ мин, или через скорость V_{20} , соответствующую нормативной стойкости $T=20$ мин поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий влияние стойкости (см. табл. 4.3) $V_T' = V_{TH} K_T$

$$K_T = \begin{cases} K_{m3} & \text{при } a \leq a_{кр}, \\ K_{mn} & \text{при } a > a_{кр}. \end{cases} \quad (4.55)$$

Табл. 4.3. Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние стойкости

T_H/T	0,5	1,0	2,0	4
$K_T, 3$	0,7	1	1,4	2,0
$K_T, п$	0,85	1	1,2	1,4

При $a \leq a_{кр}$ скорости резания, представленная в основной таблице, не зависят от толщины среза, а при $a \geq a_{кр}$ зависят. Поэтому признаку

критическая толщина срезаемого слоя легко может быть определена по таблице для определения нормативных скоростей резания V_{60} и V_{20} .

Для определения нормативных скоростей V_{60} и V_{20} необходимо предварительно по вспомогательным таблицам определить a , K_1 и K_2 [34]. В основных таблицах скорости V_{60} и V_{20} заданы в зависимости от твердости HB, критерия износа h^* и комплекса $\frac{aK_2}{K_1}$.

При определении скорости V_T , соответствующей уменьшенной стойкости T по сравнению с нормативной, необходимо сравнить полученный результат с критической скоростью.

$$v'_T = v_{TH} K_T < v_{кр}. \quad (4.56)$$

Если имеет место неравенство $v'_T > v_{кр}$, то критерий износа h^* достигается в зоне катастрофического износа и в этом случае целесообразно либо изменить h^* в меньшую сторону, либо увеличить заданную стойкость T инструмента.

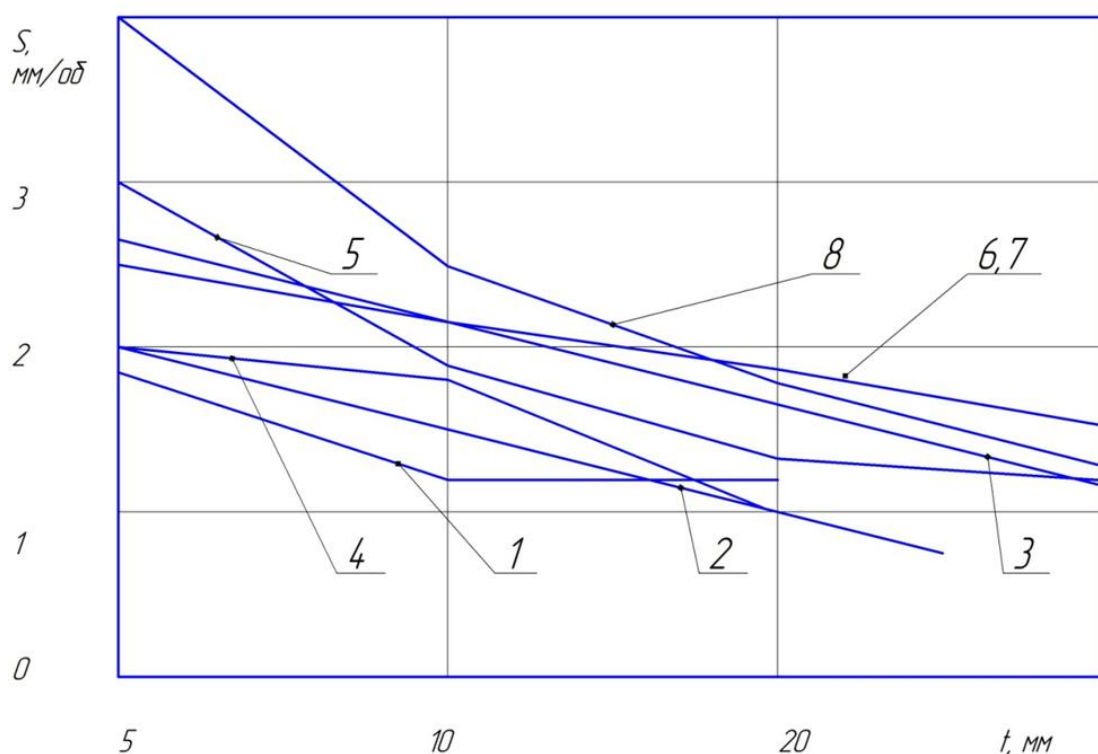
В [80] указаны значения меньшей из двух скоростей $V_{ТЗ}$ или $V_{ТП}$, ограниченных износом либо задней, либо передней поверхностей.

Для случаев, когда наименьшей оказывается скорость $V_{кр}$, ограничивающаяся прочностью инструмента, вместо значений $V_{кр}$ поставлены нули. Это означает, что обеспечение заданных стойкости T и критерия затупления h^* в зоне нормального износа невозможно. В этих случаях необходимо изменить заданные значения T и h^* (или одно из них) с тем, чтобы скорость резания не превышала критическую скорость $V_{кр}$. Значения $V_{кр}$ и $T_{кр}$ приведены [36].

Проанализировав различные нормативы, построили график зависимости рекомендуемой величины подачи от глубины резания по различным данным.

На рис. 4.22 представлены графики зависимости подач от глубины резания при точении стали на крупных станках с пластинками твёрдого сплава

T5K10 по различным источникам. Величины подач, рекомендуемые различными организациями, существенно отличаются друг от друга. Н.Н. Зоревым Н.Н. установлено, что средний уровень фактических режимов резания на ряде предприятий составляет от уровня рациональных режимов для черновых операций – 0,65, для чистовых – 0,7. Это связано с тем, что при разработке действующих нормативов не был учтён весь комплекс технологических факторов, оказывающих влияние на выбор режимов резания. В частности рекомендации по выбору подач были составлены без учёта вероятности разрушения режущего инструмента.



Продольное точение, сталь $\sigma_B = 65 \text{ кг/мм}^2$, резцы T5K10: 1 – ВПТИ, 2 и 5 – НКМЗ, 3 – ДГМА, 4 и 6 – УЗТМ, 7 – ЦНИИТМАШ, 8 – ЦБПНТ

Рис. 4.22. Зависимости рекомендуемой величины подачи от глубины резания по различным нормативам

В связи с этим, фактический расход инструмента значительно отличается от расхода, рассчитанного по существующим методикам, где в основу расчёта

положен случай чистого износа режущего инструмента, не встречающийся при черновом точении твёрдосплавным инструментом.

Исследованиями [12,13,16-20.41] показано, что твёрдосплавный и некоторые типы быстрорежущего инструмента выдерживают в 2–6 раз меньшее число периодов стойкости K , чем предусмотрено нормативами. Расхождение между фактическим и нормативным значениями принято объяснять плохой эксплуатацией инструмента. Такое объяснение верно лишь отчасти, так как соблюдение правил эксплуатации может увеличить число периодов стойкости K не более, чем в 1,5 раза. Число переточек рассматриваемого инструмента определяется его прочностью и нагрузкой на инструмент, а не допустимой величиной стачивания.

4.8 Элементы систем искусственного интеллекта для автоматического управления процессами резания на адаптивном оборудовании

Оптимальное адаптивное регулирование базируется на полной динамической исходной модели процесса резания. Оптимизация осуществляется во время всего процесса обработки и гарантирует оптимальное проведение процесса резания. Постоянное определение мгновенного положения оптимальной рабочей точки в соответствии с мгновенным состоянием процесса резания осуществляется постоянным сравнением актуальных значений характерных величин параметров.

При осуществлении автоматического цикла работы тяжелого оборудования задачи управления являются многоуровневыми и многофакторными. Кроме того, возникают ситуации, когда, либо отсутствуют необходимые датчики первичной информации, либо существующие средства измерений не обеспечивают получение требуемой информации в темпе с процессом, либо в наличии имеется лишь качественная информация об объекте управления. В этом случае адаптивное управление процессами резания должно строиться на базе многоуровневой системы принятия решений с элементами

искусственного интеллекта, которая позволяет на основе компьютерной обработки качественной или нечеткой информации об объекте и целях управления получить требуемую информацию для управления.

Металлорежущие станки для тяжелого резания, оснащенные системами оптимального управления на базе станков с ЧПУ, представляют в настоящее время высшую степень автоматизации и оптимизации процесса обработки. При разработке системы оптимального регулирования разработаны взаимосвязи между статистической и непрерывной оптимизациями, которые представлены на рис. 4.23. В основе оптимального регулирования лежит динамическая модель процесса резания. Значения критериев для оптимального адаптивного регулирования представляют экстремальные значения критериев оптимальности процесса резания, соответствующих целевым функциям статистической оптимизации. Вид и сущность изменяемых со временем значений в целевых функциях устанавливается с помощью обработанных сигналов, характеризующих процесс обработки.

Система обработки резанием представляет собой необходимую для обработки данной заготовки на станке регулируемую совокупность инструментов, приспособлений, технологической среды, с одной стороны, и процесса резания – с другой. Процесс резания характеризуется большим числом параметров. В общем случае любой из них может быть регулируемым.

В число управляемых параметров внесены вариант и геометрические параметры инструмента. Предусматривается возможность выбора оптимальной конструкции режущего инструмента из имеющегося набора по критериям работоспособности, производительности, экономичности и обеспечению удовлетворительного стружкодробления. Оптимизация геометрических параметров режущего инструмента заключается в том, что во время точения в случае отклонения регулируемого параметра от заданного значения меняют геометрию резания за счет вращения резца вокруг продольной оси, проходящей через вершину резца и перпендикулярной к обрабатываемой поверхности.



Рис. 4.23. Взаимосвязь между статистической и непрерывной оптимизациями для систем оптимального регулирования

При этом изменяются угол резания δ , угол наклона режущей кромки λ , главный угол в плане φ , вспомогательный угол в плане φ_1 , радиус при вершине r . Изменение геометрии резания может оказывать существенное влияние на такие управляемые параметры как величина силы резания, температура в зоне резания, скорость износа режущего инструмента, форма образующейся

стружки. Например, наиболее приемлемыми управляющими величинами с точки зрения наибольшего влияния на вектор силы резания являются угол резания δ и главный угол в плане φ . Влияние на составляющие силы резания, изменения геометрии резания поворотом резца можно выразить следующими зависимостями:

$$P_z = C_1 \delta^{x_1} (1 - n_{P_z} \Delta \alpha) (1 - n_{P_z} \Delta \lambda) (1 - n_{P_z} \Delta \varphi); \quad (4.57)$$

$$P_Y = C_1 \delta^{x_1} (1 - n_{P_Y} \Delta \alpha) (1 - n_{P_Y} \Delta \lambda) (1 - n_{P_Y} \Delta \varphi); \quad (4.58)$$

$$P_X = C_1 \delta^{x_1} (1 - n_{P_X} \Delta \alpha) (1 - n_{P_X} \Delta \lambda) (1 - n_{P_X} \Delta \varphi), \quad (4.59)$$

где n_{pi} – коэффициент, характеризующий влияние заднего угла на соответствующую составляющую силы резания; m_p – коэффициент, характеризующий влияние угла наклона главной режущей кромки на соответствующую составляющую силы резания; k_{pi} – коэффициент характеризующий влияние главного угла в плане на соответствующую составляющую силы резания; C_z, C_Y, C_X – коэффициенты, зависящие от условий обработки.

Оптимизацию геометрических параметров инструмента во время обработки также предложено проводить с учетом влияния угла в плане и конструктивных параметров передней поверхности СМП на диапазон удовлетворительного стружкодробления. В работах [41,147] экспериментально установлено влияние углов в плане и конструктивных параметров передней поверхности СМП, наиболее часто встречающихся на предприятиях тяжелого машиностроения (ширины фаски, ширины канавки, высоты профиля канавки, угла между режущей кромкой и канавкой) на области дробления стружки. Установлено, что для удовлетворительной с точки зрения безопасности станочника и удобства уборки стружки коэффициент деформации стружки должен находиться в пределах 1,8...2,7. Получены регрессионные зависимости коэффициента деформации стружки от режимов резания, необходимые для

ограничения режимов резания по виду получаемой стружки. Установлено, что при точении сталей твердосплавными резцами с СМП происходит изменение формы стружки от удовлетворительной к неудовлетворительной (что связано с изнашиванием элементов стружкодробления пластин с течением времени) предложена методика определения степени влияния формы конструктивных элементов передней поверхности СМП на область режимов резания, обеспечивающих стружкодробление с использованием метода обработки неколичественных данных. Это позволит корректировать форму образующейся стружки в процессе обработки.

Также проведены исследования влияния скорости резания на процесс стружкообразования. Установлено, что скорость резания является одним из основных факторов, который определяет температуру в зоне стружкообразования и соответственно температуру стружки. Температура же стружки определяет ее механические свойства. С увеличением температуры увеличивается пластичность стружки. Следовательно, стружка может выдержать без разрушения большую деформацию.

К управляемым параметрам можно также отнести параметры и структуру несущей системы станка. В зависимости от первичных параметров, внешних воздействий, информации от измерительных и диагностических каналов регулируют не только геометрическую и кинематическую настройку станка, но и жесткостные характеристики шпиндельного узла, суппортов, включают дополнительные узлы коррекции и демпфирующие устройства [2]. Жесткость узлов можно изменять путем применения гидростатических опор, регулируемых от системы управления.

Таким образом, алгоритмы работы оптимальной системы адаптивного управления формируются с включением критериев: себестоимость обработки, производительность, точность, качество и надежность системы и др. Структура адаптивной технологической системы должна иметь высокую степень охвата обратными связями: по относительному положению и траекториями формообразующих движений элементов системы; их физическим состояниям и

возмущающим воздействиям. При осуществлении автоматического цикла работы тяжелого оборудования задачи управления являются многоуровневыми и многофакторными. Кроме того, возникают ситуации, когда либо отсутствуют необходимые датчики первичной информации, либо существующие средства измерений не обеспечивают получение требуемой информации в темпе с процессом, либо в наличии имеется лишь качественная информация об объекте управления. В таком случае адаптивное управление процессами резания должно строиться на базе многоуровневой системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта, которая позволяет на основе компьютерной обработки качественной или нечеткой информации об объекте и целях управления получить требуемую информацию для управления.

Одной из проблем, стоящих перед наукой о резании металлов, является разработка методов, обеспечивающих автоматическую стабилизацию наиболее важных параметров процесса резания. К числу важнейших параметров относится температура резания, и в частности, ее оптимальное значение Θ_0 [77]. Многочисленные технологические испытания показали, что обработка деталей с использованием оптимальных температур резания позволяет значительно увеличить размерную стойкость инструмента, получить минимальные для выбранных условий силы резания, шероховатость поверхности, глубину и степень наклепа, а также наиболее стабильное и равномерное распределение остаточных напряжений в различных точках обрабатываемой поверхности.

Работа станков в производственных условиях с использованием оптимальных температур резания является наиболее целесообразной, однако на обычных станках температура в зоне резания изменяется с износом инструмента, изменением структуры материала, диаметра обрабатываемой поверхности, динамической жесткости системы и т. д. В этих условиях становится крайне необходимой автоматизация процессов резания с помощью оснащения металлорежущих станков специальными системами автоматического регулирования, которые независимо от случайных или закономерных причин, вызывающих изменение температуры в зоне резания,

автоматически поддерживают одно и то же постоянное, заранее заданное оптимальное значение температуры резания. Таким образом, здесь имеет место более высокая ступень автоматизации операций механической обработки, когда автоматизируются сами процессы резания, когда их протекание автоматически и постоянно поддерживается на оптимальном уровне.

Комплексное рассмотрение механических и тепловых явлений на основе уравнений баланса энергий в целом всего процесса и в отдельных (локальных) местах зоны резания (условная плоскость сдвига, контактные площадки инструмента) позволяет получить теоретические формулы для определения угла сдвига (усадки стружки), температуры и силы резания без постановки опытов.

Используя теоретические зависимости, имеем возможность получить функцию изменения скорости резания в зависимости от температуры:

$$v_0 := \frac{K^2 \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot a_I \cdot b_I^2 \cdot \left(\frac{a_I}{\rho_I}\right)^{0.2}}{4 \cdot (\sin(\alpha))^{0.1}} \cdot \left(\frac{\Theta_0}{R_z}\right)^2 \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2.65 \lambda_p \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{a_I}{b_I}\right)^{0.3} \cdot R_z}{K^2 \cdot a_I \cdot b_I \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \left(\frac{a_I}{\rho_I}\right)^{0.025} \cdot (\sin(\alpha))^{0.065} \cdot \Theta_0}} \right]^2, \quad (4.60)$$

Проведя расчет с использованием данных о режимах резания, геометрии резца и физических свойствах материала резца и заготовки получим рекомендованную оптимальную скорость течения для данных условий:

$$v_0 = 1,89 \cdot 10^3 \lambda c \rho \left(\frac{\theta_0}{\tau \rho}\right)^2 \left[1 + \sqrt{1 + 2,367 \frac{\lambda \rho}{\lambda} \cdot \frac{\tau \rho}{c \rho \theta_0}} \right]^2. \quad (4.61)$$

В результате теоретических расчетов температуры в зоне резания при различных скоростях был получен график зависимости температуры от

скорости резания. С помощью аппроксимации методом наименьших квадратов была получена линейная зависимость параметров, представленная на рис. 4.25

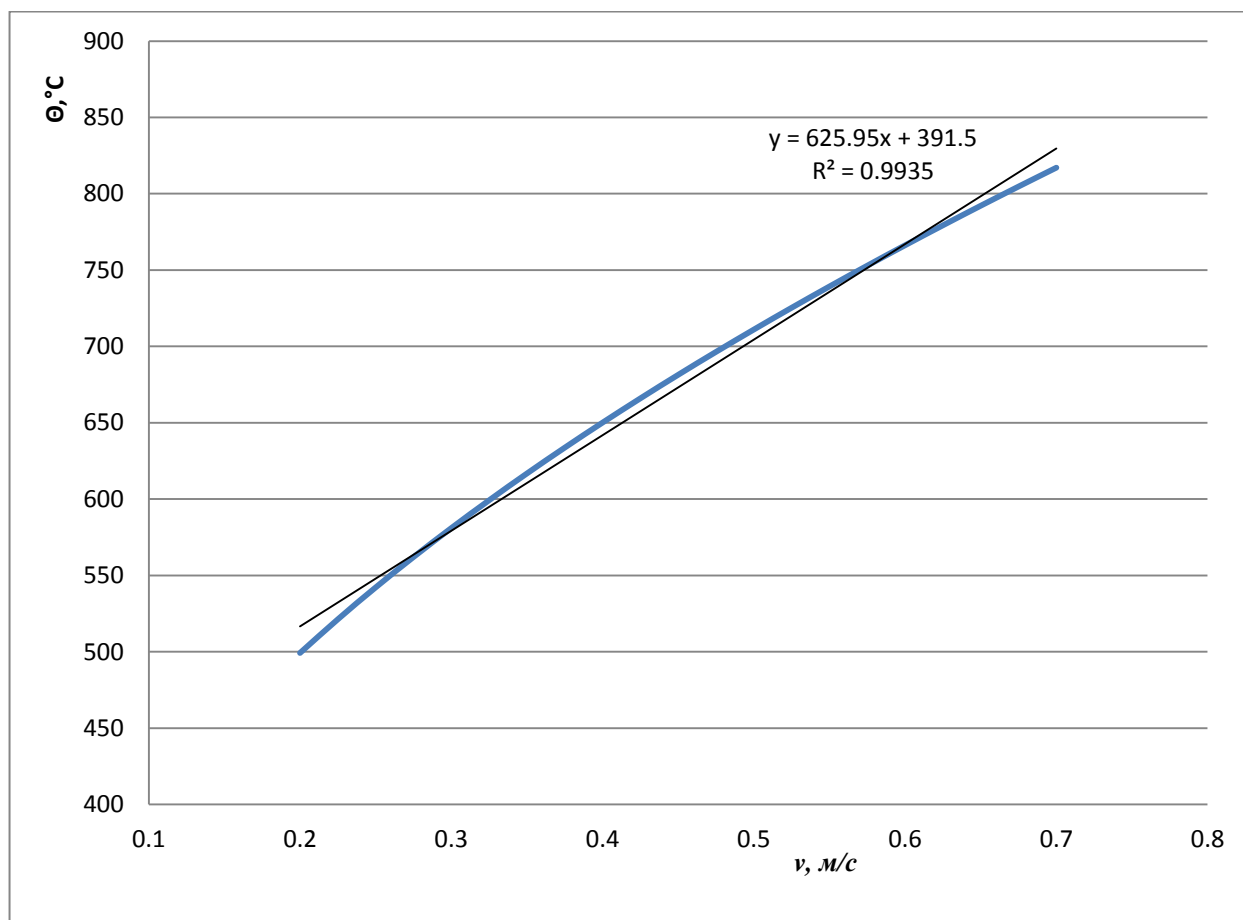


Рис. 4.25. Зависимость температуры от скорости резания

Таким же образом может быть получена зависимость силы резания от подачи.

Данные зависимости можно использовать для управления и оптимизации процесса резания с помощью станка с числовым программным управлением и программируемым логическим контроллером.

Оптимизация процесса резания проводится с учетом определения рациональных режимов резания, параметров расхода инструмента, уровня надежности и уровня психофизической нагрузки на станочника. Задача является многокритериальной. Критериями эффективности при определении

регламентов процесса резания могут быть все выходные параметры процесса резания, каждый из них, любое их сочетание.

Часть выходных параметров, не являющихся критериями эффективности, служат ограничениями и определяют область допустимых решений при определении сочетания элементов режима резания.

Глубина резания при черновой обработке связана с величиной и рассеиванием припусков на механическую обработку, которые в свою очередь обусловлены размерами деталей и точностью существующих технологических процессов получения заготовок.

Оптимизация режимов резания осуществляется одновременно по двум переменным – подаче S и скорости резания V (или частоте вращения детали n).

Особенностью управления является то, что при его использовании для поиска оптимального сочетания подачи и скорости резания почти всегда оптимум находится в области допустимых решений. Это объясняется наличием в функционале связей, позволяющих учесть изменение периода стойкости инструмента с учетом изнашивания и разрушения инструмента. При использовании нескольких критериев оптимальности оптимизация производится по каждому из них, а принятие окончательного решения – путем сравнения полученных значений.

Целевыми функциями для оптимизации приняты затраты, производительность, расход инструмента, надежность и психофизическая нагрузка на рабочего. Изменяя набор критериев и делая большие уступки в сторону одного из них, в зависимости от требований к процессу, можно управлять его эффективностью. В случае наличия дополнительных линейных ограничений на параметры процесса, не учтенных в целевых функциях, оптимальные решения находятся в плоскости, образованной пересечением поверхности функционала с линией ограничения.

4.9 Результаты стойкостных испытаний

Испытания проводили при продольном точении на станке мод. 1А64 на следующих режимах:

- при точении стали 45: глубина резания 0,5 мм, подача 0,2 мм/об;
- при точении стали 12Х18Н10Т: глубина резания 0,25 мм, подача 0,2 мм/об.

Скорость резания увеличивалась в установленных пределах. При каждом значении скорости резания фиксировали стойкость, критерием отказа считали износ по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм.

С целью получения более точных результатов опыты повторяли.

Пластины устанавливали на резцах с сечением державка 25х25 мм. Резцы имели следующие геометрические параметры: $\varphi = 82^\circ$, $\gamma = +2^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\varphi_1 = 38^\circ$, $\varepsilon = 60^\circ$, $\lambda = +6^\circ$.

Установлено, что при точении стали 45 стойкость пластин ВК8 и ВК8+NbCN минимальна и не превышает 18 мин. Это свидетельствует о непригодности данных пластин для обработки стали 45.

Пластины с трехслойными покрытиями (ВК8+TiC+TiCN+TiN) обеспечивают нормативную стойкость при скорости резания 70...110 м/мин. При дальнейшем увеличении скорости резания стойкость резко уменьшается, что, очевидно, вызвано низкой термической стойкостью покрытия или его отслаиванием.

При точении стали 12Х18Н10Т наибольшую стойкость при скорости резания 88 м/мин имеют пластины (ВК8+TiC+TiCN+TiN) и (ВК8+TiC+TiCN+TiC).

При данной скорости резания стойкость выше нормативной имеют пластины (в порядке убывания):

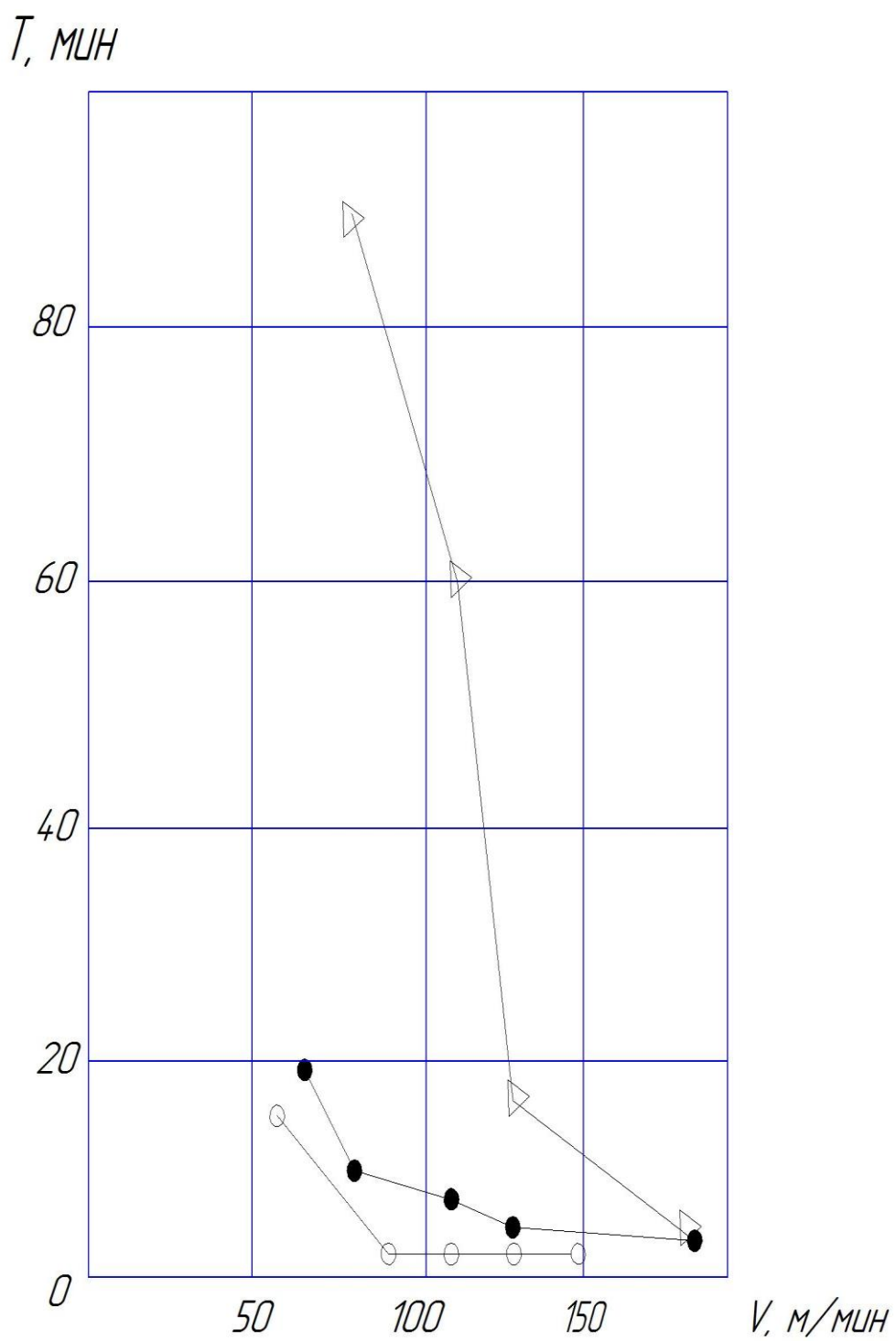
1. ВК8+TiC+TiCN+TiN;
2. ВК8+TiC+TiCN+TiN ($\mu = 5900$ кгс/мм²);
3. ВК8+TiC+TiCN+TiC.

Дальнейшее увеличение скорости резания вызывает резкое снижение стойкости пластин, что, очевидно, вызвано указанными выше причинами. Очень не стабильные режущие свойства (большое рассеивание стойкости) имеют пластины BK8+ (TiAl)N.

Пластины BK8, (BK8+NbCN), BK8+(TiCr)N и BK8+ (TiAl)N не обеспечивают нормативной стойкости (60 мин) при скорости резания 88м/мин. Что свидетельствует о непригодности данных пластин для чистовой обработки нержавеющей стали.

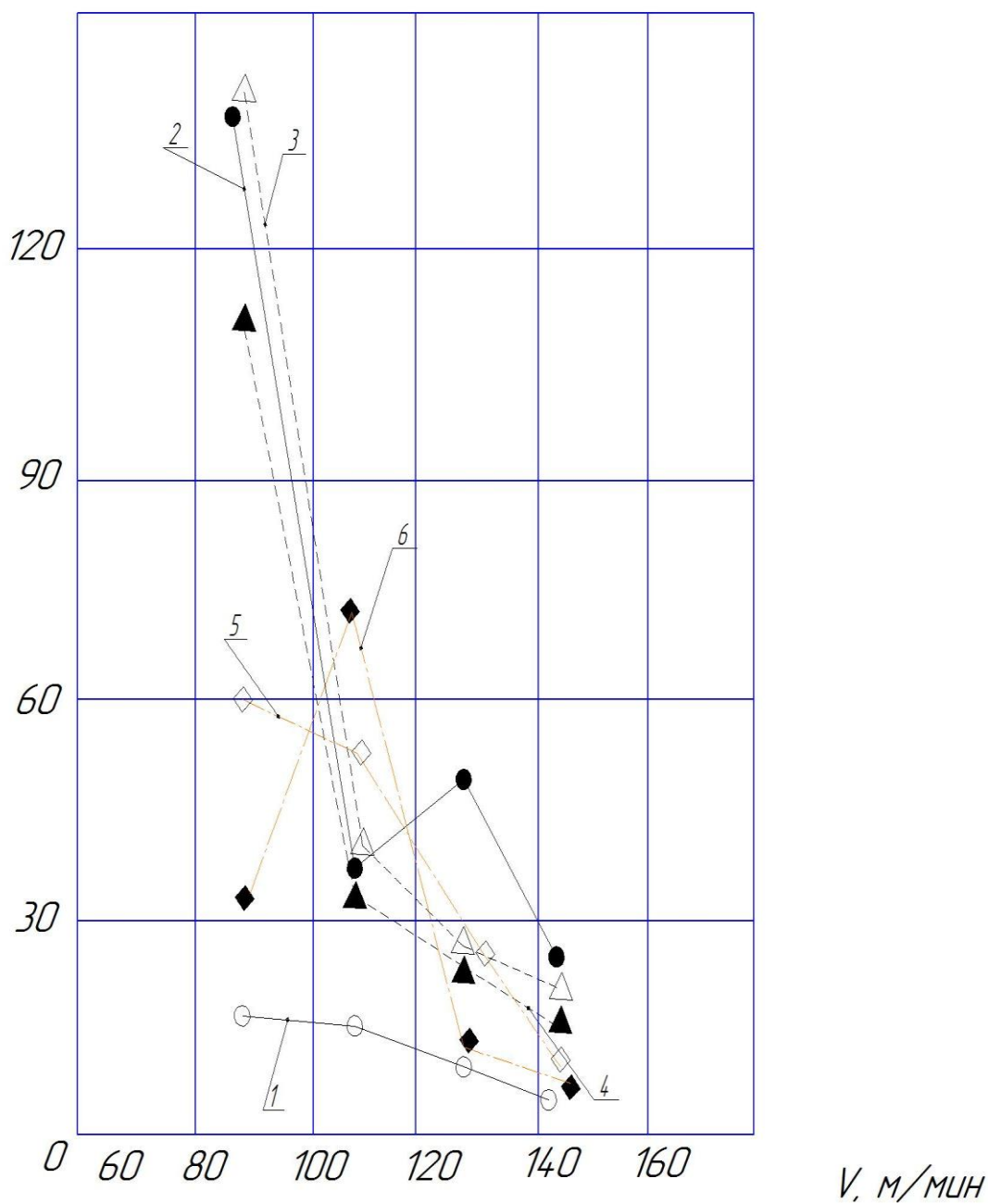
При точении стали 40ХН2МА пластинами T5K10 и T15K6 эффективность режущего инструмента с различными покрытиями оказалась различной. Наибольшее повышение стойкости показали пластины T15K6+(TiAl)N (режим 6B), T15K6 +(TiCr)N и T15K6+Z₂+Z₂N. Наименьшее повышение стойкости обнаружено на пластинах T15K6+(TiAl)N (режим 2B), T15K6+TiC+TiN (CBC). Результаты испытаний приведены в табл.4.4.

При чистовом точении коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т пластинами МС 3210 (BK6+TiCДТ) упрочненными имплантацией ионов N₂⁺ и H₂⁺ наблюдалось равное повышение стойкости для обоих вариантов (см. табл. 4.5). Это свидетельствует о целесообразности применения данных пластин для чистовой обработки нержавеющей сталей и необходимости продолжении работ в этом направлении.



1 – сплав ВК8, 2 – ВК8+NbCN, 3 – ВК8+TiC+TiCN+TiN (обрабатываемый материал – сталь 45, $t=0.5$ мм, $S=0.2$ мм/об)

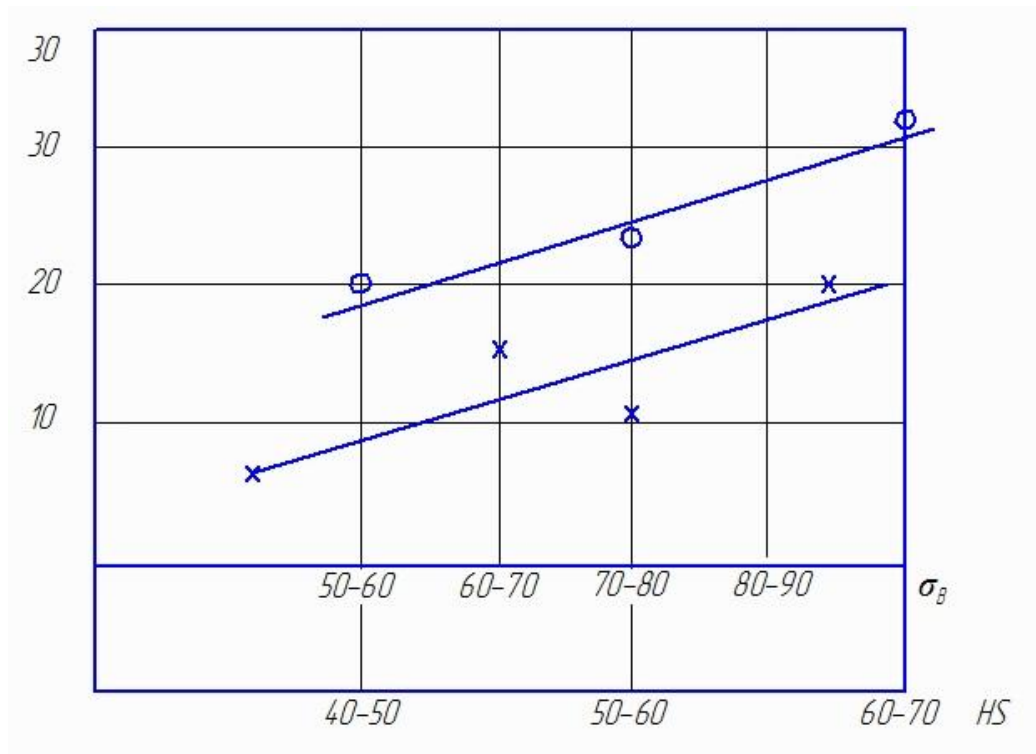
Рис. 4.26. Зависимость стойкости от скорости резания.

$T, \text{ мин}$


1 – BK8; 2 – BK8+TiC+TiCN+TiN; 3 – BK8+TiC+TiCN+TiN ($\mu = 4500 \text{ кгс/мм}^2$);
 4 – BK8+TiC+TiCN+TiC; 5 – BK8+ NbCN; 6–BK8+(TiCr)N.

Обрабатываемый материал – сталь 12Х18Н10Т, $t=0.25 \text{ мм}$; $S=0.2 \text{ мм/об}$

Рис. 4.27. Зависимость стойкости от скорости резания



х-х – среднеуглеродистая сталь; о-о – твердый чугун

Рис. 4.28. Зависимость процента выкрашивания пластин твердого сплава от предела прочности на растяжение среднеуглеродистой стали и твердости по слою твердого чугуна

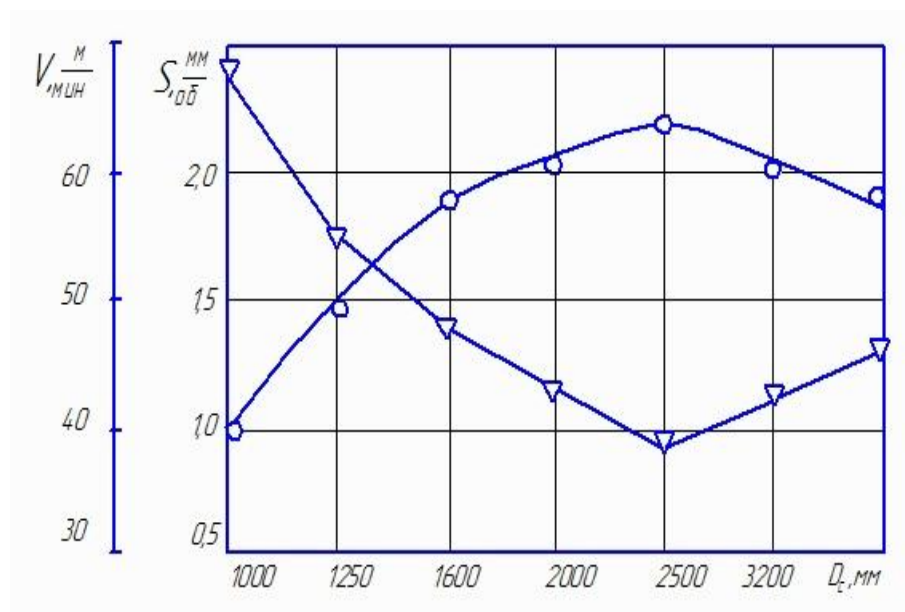


Рис. 4.29. Зависимость оптимальных режимов резания от типоразмера станка (сталь НВ210, Т5К10, t = 15мм)

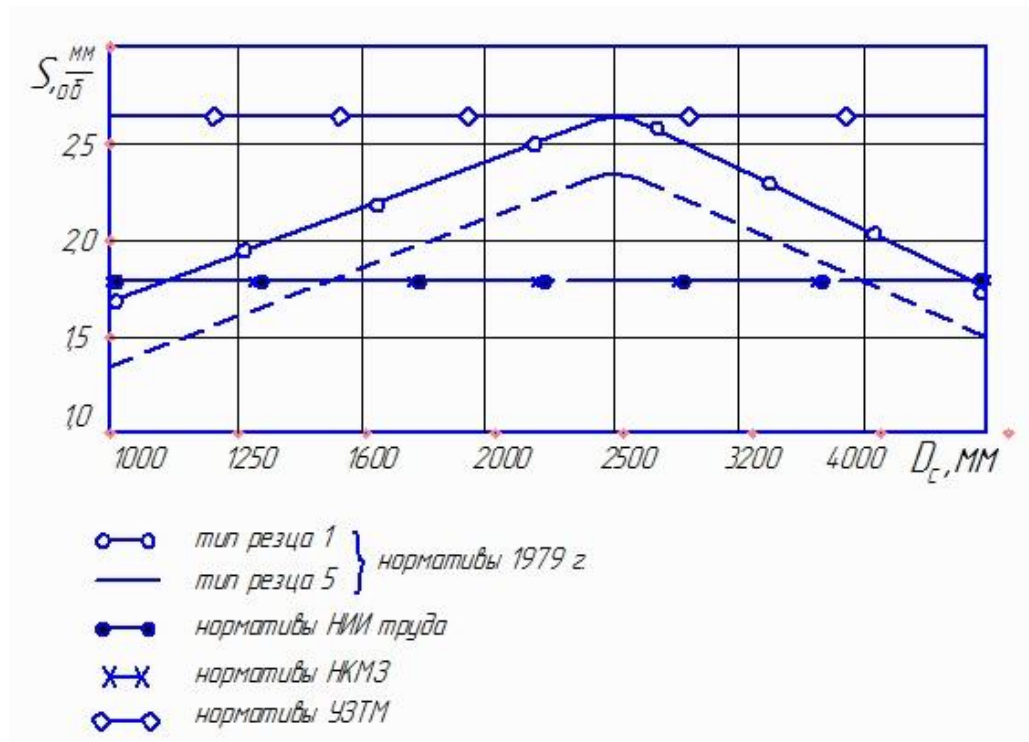


Рис. 4.29. Уровень подач принятый в нормативах

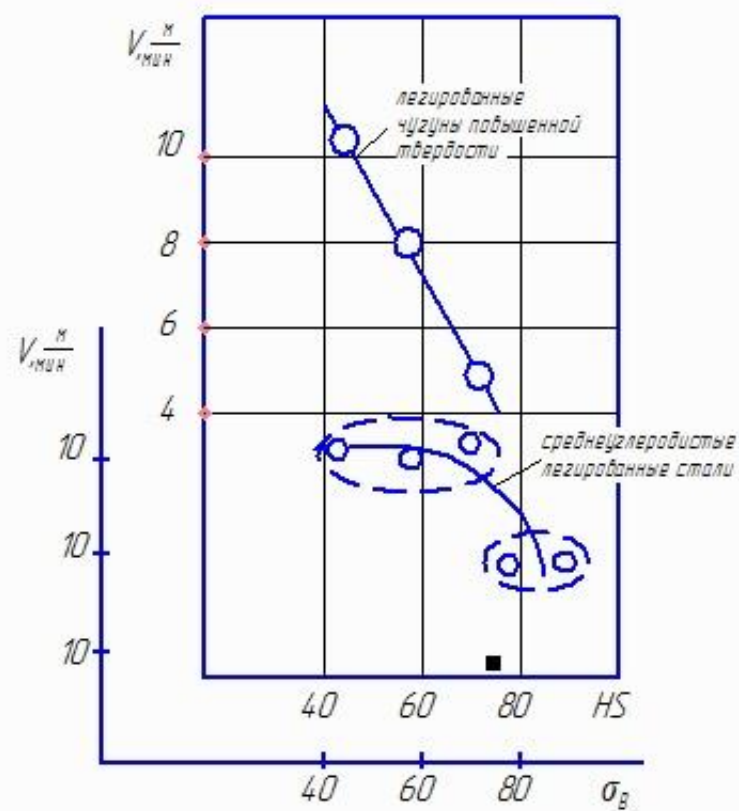
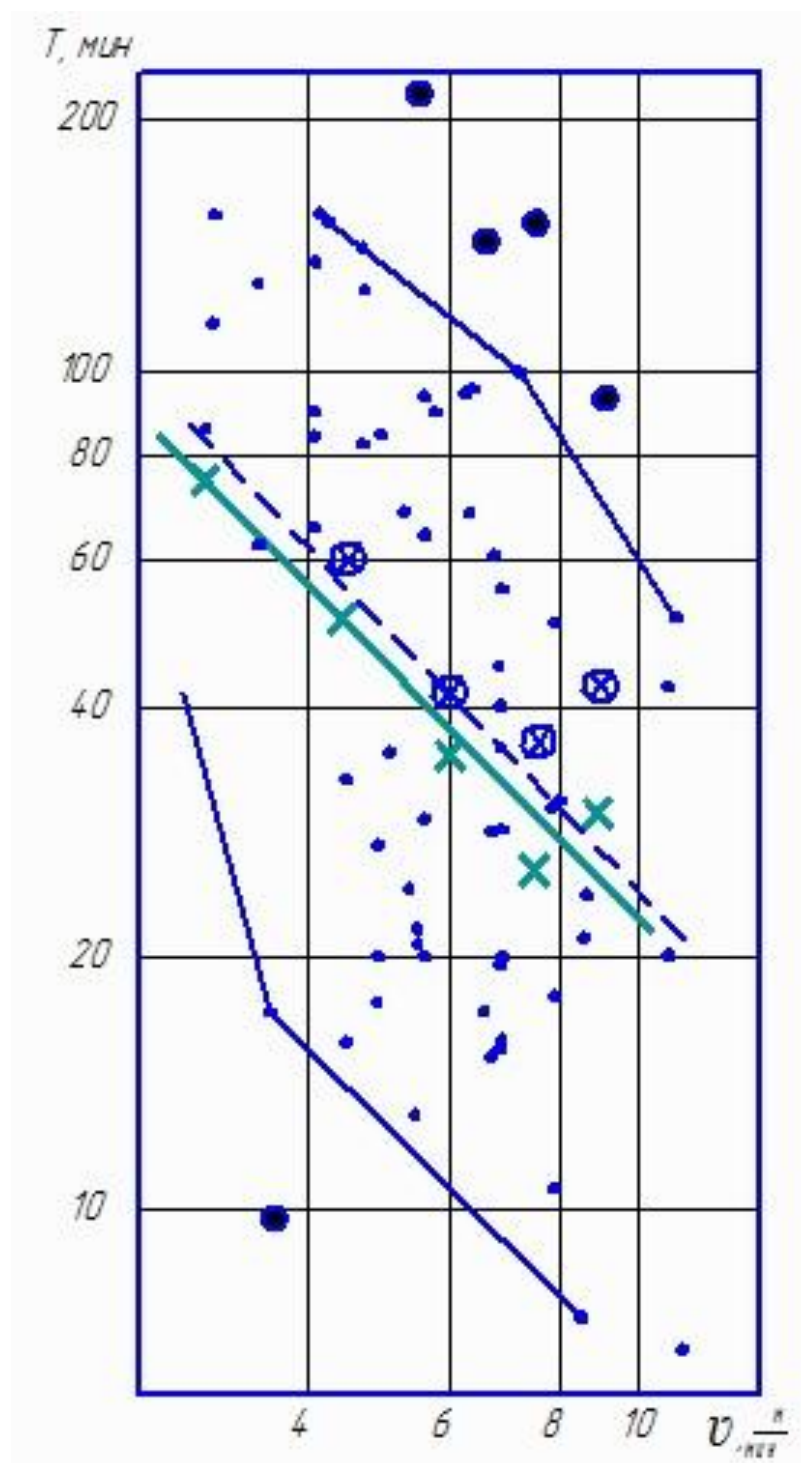
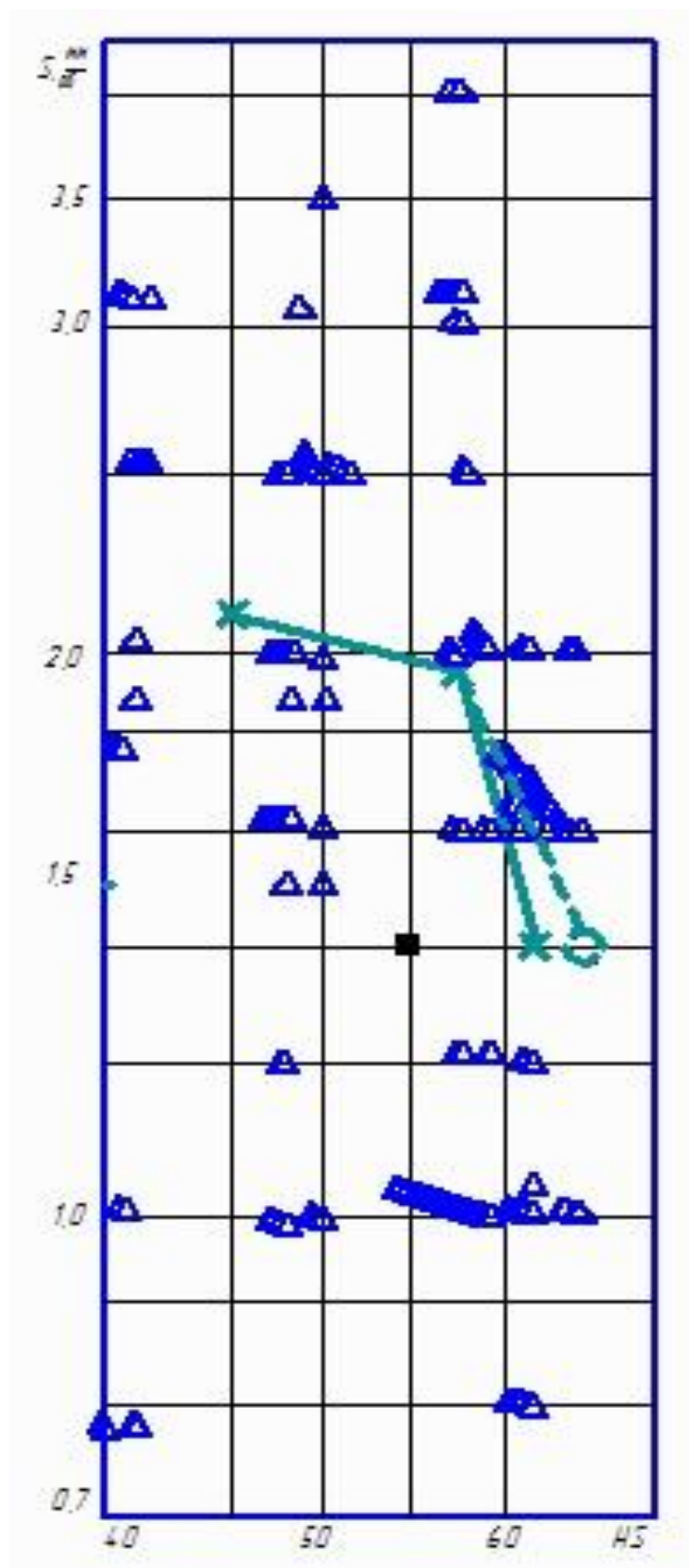


Рис. 4.30. Корреляционная связь скорости резания с прочностью обрабатываемого материала



Продольное точение бочек прокатных валков из легированного твердого чугуна
СШХН – 50, СЛХН – 51, СЛХН – 59 и другие с твердостью HS 50...60

Рис. 4.31. Корреляционное поле связи стойких токарных резцов со скоростью резания



Переход - продольная обточка бочки (черточками отмечено количество совпадающих точек)

Рис. 4.32. Кривая регрессии подачи от твердости бочки

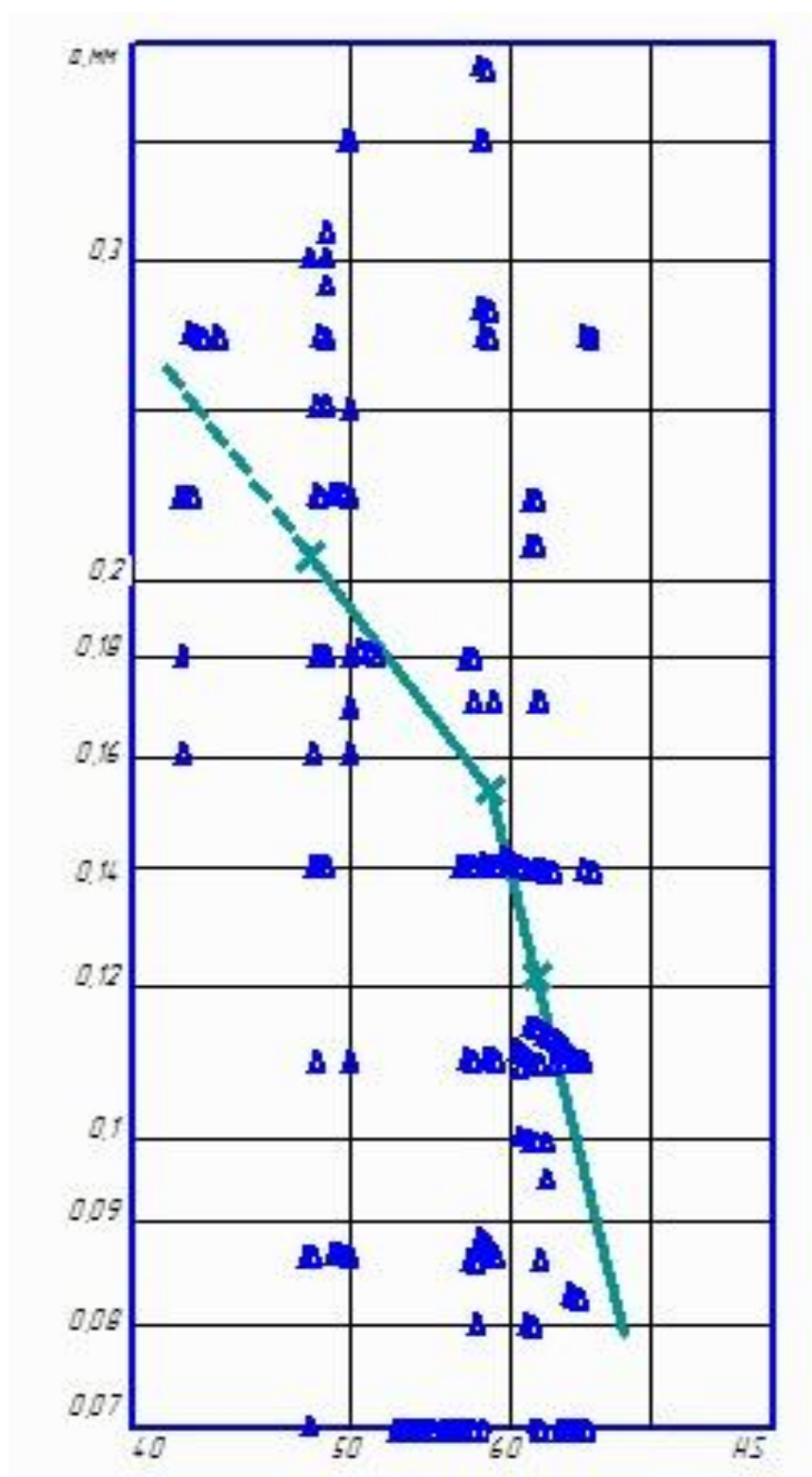


Рис. 4.33. Корреляционная связь толщины среза с твердостью бочки прокатного вала из легированного чугуна ДВЧЗ

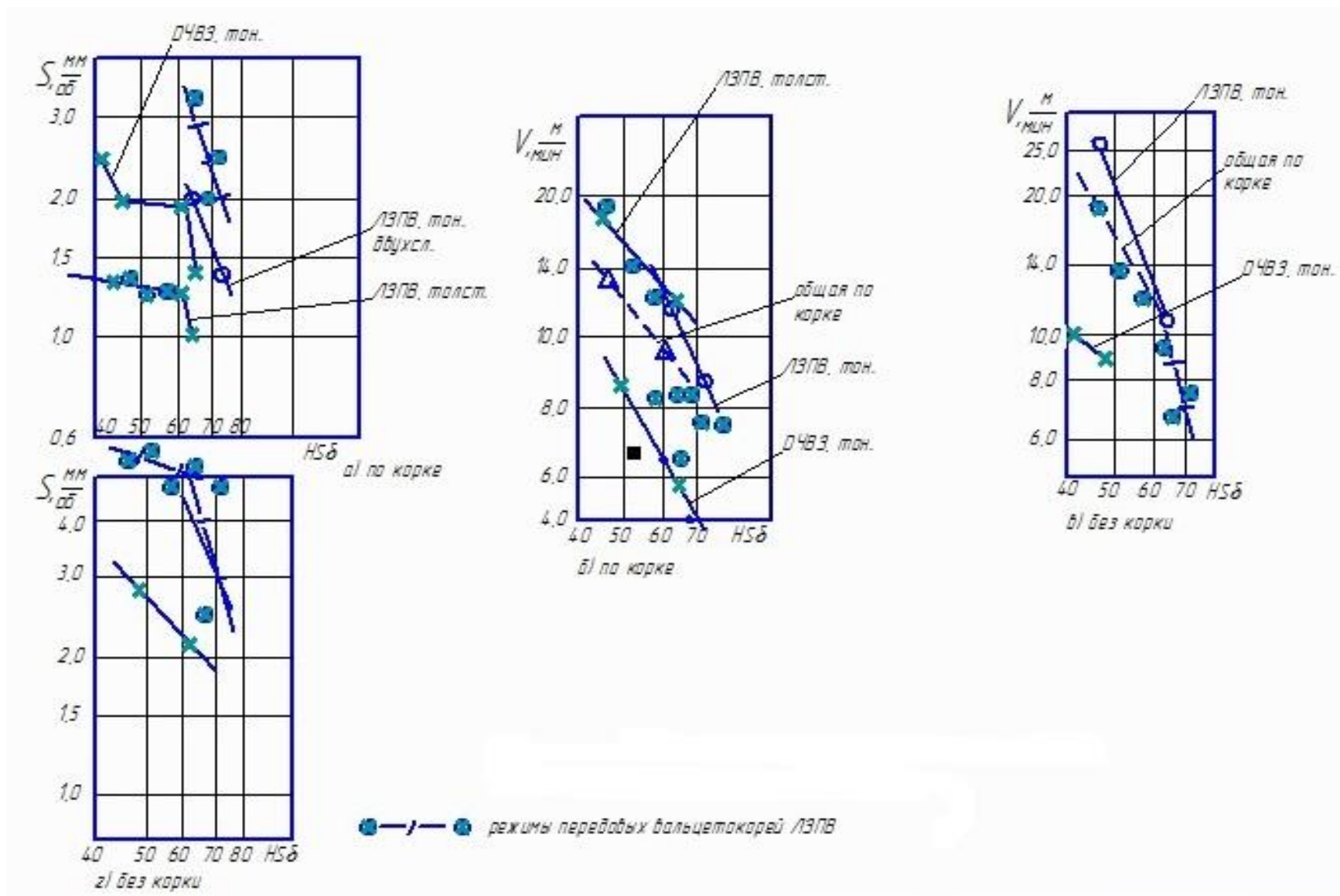


Рис. 4.34. Корреляционная связь подачи с твердостью легированного чугуна

Табл. 4.4. Результаты лабораторных испытаний пластин при точении стали 45

BK8				BK8+NbCN				BK8+TiC+TiCN+TiN			
Скорость резания, м/мин	Стойко сть Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$		Скорость резания м/мин	Стойкость Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$		Скорость резания, м/мин	Стойко сть Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$	
		C_v	m			C_v	m			C_v	m
54	15	$170,6 \cdot 10^4$	2,96	65	18	$918 \cdot 10^3$	2,59	65	17	$619,7 \cdot 10^7$	4,56
90	2,0			78	12			78	91		
110	1,5			110	7,1			110	63		
130	1,3			134	1,9			134	18		
152	0,6			185	1,4			185	2,0		

Табл. 4.5. Результаты лабораторных испытаний пластин при точении стали 12Х18Н10Т

BK8				BK8+TiC+TiCN+TiN				BK8+TiC+TiCN+TiN			
Скорость резания, м/мин	Стойко сть Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$		Скорость резания м/мин	Стойкос ть Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$		Скорость резания, м/мин	Стойко сть Т, мин	Коэффициент ы в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$	
		C_v	m			C_v	m			C_v	m
54	15	$170,6 \cdot 10^4$	2,96	65	18	$918 \cdot 10^3$	2,59	65	17	$619,7 \cdot 10^7$	4,56
90	2,0			78	12			78	91		
110	1,5			110	7,1			110	63		
130	1,3			134	1,9			134	18		
152	0,6			185	1,4			185	2,0		

Табл. 4.6. Результаты лабораторных испытаний пластин при точении стали 12Х18Н10Т

BK8+NbCN				BK8+(TiCr)N				BK8+ (TiAl)N			
Скорость резания, м/мин	Стойкость Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$		Скорость резания м/мин	Стойкость Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$		Скорость резания, м/мин	Стойкос ть Т, мин	Коэффициенты в формуле $T = \frac{C_v}{V^m}$	
		C_v	m			C_v	m			C_v	
88	61	$394,4 \cdot 10^6$	3,54	88	36	$674,6 \cdot 10^5$	3,14	88	160;45	-	
108	54			108	75			108	12;129		
128	23			128	12			128	10,0		
143	11			143	8,5			143	6,0		

Табл. 4.7. Эффективность режущего инструмента с покрытиями

Операции, режимы, обрабатываемый материал	Марка твердого сплава	Коэффициент повышения стойкость												
		H ₂ ⁺ (НН)	N ₂ ⁺ (НН)	TiN (КИБ)	TiN+H ₂ (КИБ+НН)	TiC+TiN (СВС	(TiCr)N (КИБ)	Z ₂ N (КИБ)	TiN(M oCr) (КИБ)	MoZ ₂ N (КИБ)	Ti(iAl) N Реж6Б (КИБ)	Ti(iAl) N Реж2Б (КИБ)	Z ₂ N+N bN (КИБ)	Z ₂ +Z ₂ N (КИБ)
Точение 40ХН2МА V=264 м/мин S=0.2 мм/об t=0.25 мм	T15K10 T15K6			1.4	1.73	1.1	1.5	1.3	1.13	1.3	1.93	1.03	1.28	1.55

Выводы по разделу 4

1. Разработаны методика структурно-параметрического синтеза тяжелых токарных станков с ЧПУ и рекомендации по их проектированию.
2. Выявлены критерии оптимизации и ограничения на управляемые параметры процесса механической обработки на тяжелых станках. Законы управления адаптивной системой получены на основе оптимизации режимов резания.
3. Предложена концепция для автоматического управления процессом резания на адаптивном оборудовании.
4. Проведена экспериментальная проверка оптимальных параметров процесса резания. Установлены взаимосвязи между режимами резания и параметрами технологической системы.
5. Разработаны нормативы режимов резания на тяжелых токарных станках с ЧПУ.
6. Проведены испытания режущих пластин с износостойкими покрытиями. Получены стойкостные зависимости, положенные в основу системы оптимального управления.

5 СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЯЖЕЛЫХ СТАНКАХ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА

5.1 Реализация законов управления режимами обработки на тяжелом токарном станке посредством PLC модулей

Технологическое оборудование с позиции теории управления является многоконтурной системой с нелинейными элементами и нестационарными свойствами. При назначении оптимальных режимов резания необходимо учитывать множество факторов, связанных с фактическим состоянием заготовки, инструмента и всей технологической системы в целом. Этим и определяется актуальность оптимизации режимов механической обработки изделий тяжелого машиностроения с учетом фактического состояния процесса в режиме реального времени.

Современные системы ЧПУ, построенные на базе промышленных ПК, имеют существенный запас вычислительной мощности и развитый набор дополнительных входов, что позволяют использовать информацию от измерительных устройств, которые фиксируют параметры процесса обработки (температуру, усилия, крутящие моменты, вибрации и др.). С помощью этих средств имеется возможность в процессе обработки динамически корректировать режимы резания, размерную настройку инструмента, а в ряде случаев и технологию обработки, т. е. программу ЧПУ. Некоторые системы также дают возможность осуществления управления в режиме самообучения, с переменной структурой программы обработки, многомерными обратными связями. Для осуществления новых прогрессивных принципов управления используются и разрабатываются новые мехатронные системы.

Современные системы ЧПУ, в отличие от предшествующих аналогов, выполнены на основе персональных компьютеров с открытой архитектурой. Это позволяет решать задачи автоматического регулирования путём программирования соответствующих алгоритмов. Функции адаптивного

управления могут быть решены на основе составления параметризованных программ обработки на станке, в которых имеется возможность связать значения отдельных параметров со значениями сигналов от различных датчиков, а также за счет использования свободных программных и аппаратных ресурсов контроллера электроавтоматики станка (PLC) [2].

5.2 Системы ЧПУ для реализации адаптивного управления

Законы управления режимами обработки на тяжелом токарном станке, а именно управление скоростью резания для достижения оптимальной температуры и управление подачей для регулирования силы резания реализованы посредством ПЛК.

Для разработки и исследования методов адаптивного управления тяжелым токарным станком с помощью средств ПЛК использованы системы ЧПУ Heidenhain TNC 320 (рис. 5.1) и Heidenhain MANUAL plus 620 (рис. 5.2) с интегрированным программным ПЛК.

К его главным характеристикам, важным для решения задач адаптивного управления, относятся:

- большой объем памяти программ, ограниченный только объемом свободной памяти базового промышленного компьютера;
- возможность работы, как с логическими переменными, так и числовыми, представленными в простой форме и в форме с плавающей запятой;
- богатый набор математических операций;
- развитый программный интерфейс связи с системой ЧПУ на основе API, что позволяет из программы ПЛК влиять на многие значения в программах обработки, как до их запуска, так и в процессе выполнения, включая параметры режимов резания и размерную настройку.

Для упрощения программирования контроллера производителем предоставляется базовая программа PLC, которая служит основой для согласования ЧПУ с соответствующим типом станка.



Рис. 5.1. Внешний вид системы управления HeidenhainTNC 320

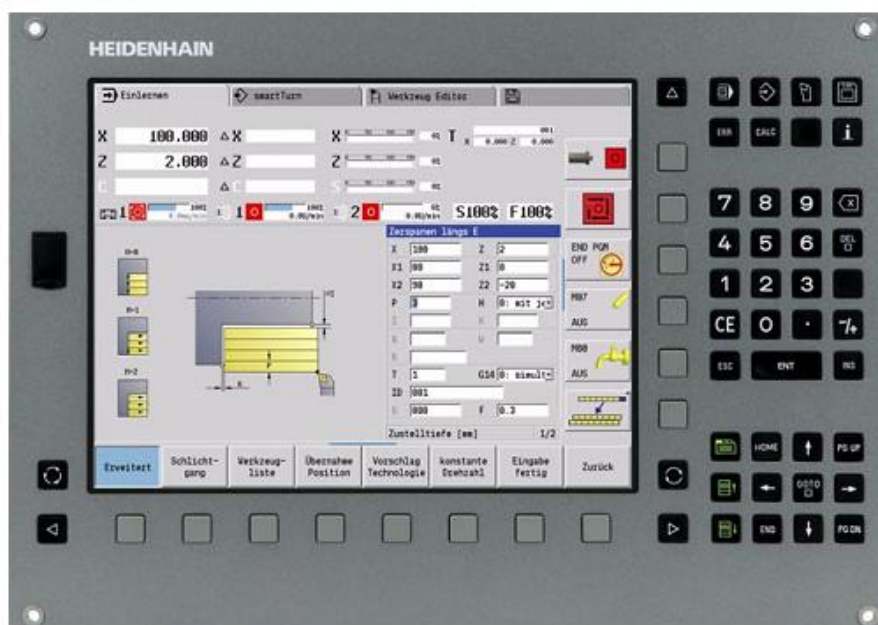


Рис. 5.2. Внешний вид системы управления Heidenhain MANUAL plus 620

Базовая программа PLC охватывает следующие функции:

- управление всеми осями;
- позиционирование осей после обнуления;
- оси с зажимом;
- движение осей во всем диапазоне перемещений;
- температурная компенсация осей;
- регулирование подачи;
- управление индексированием;
- управление и ориентация основного шпинделя;
- активация контроля крутящего момента с учетом выбранного инструмента;
- ручная и автоматическая смена инструмента;
- функции для наладки устройства смены инструмента;
- тип инструментального магазина;
- функции индикации в малом окне PLC;
- управление гидравликой станка;
- управление электронными маховичками;
- управление системой подачи СОЖ;
- работа с М-функциями;
- смазка;
- транспортер стружки;
- измерительные щупы;
- управление защитными ограждениями;
- центральный привод.

С помощью современной системы ЧПУ оснащенной PLC можно оперативно регулировать скорость резания, соблюдая законы оптимальной температуры в зоне резания [8,77,85,100], которую можно измерять как методом термопары, так и оптически (что более предпочтительно).

5.3 Технические возможности ПЛК, интегрированного в системы управления HeidenhainTNC 320 и Heidenhain MANUAL plus 620

На базовом блоке в минимальной конфигурации имеется 32 дискретных входа, рассчитанных на стандартный промышленный сигнал 0/24В и поглощающих ток 10 мА, и 32 дискретных выхода 0/24В, способных управлять нагрузкой до 160 мА. Кроме того имеется два аналоговых входа, рассчитанные на стандартный сигнал 0...10В, штатно используемые для подключения ручных корректоров скорости подачи и частоты вращения шпинделя, но которые возможно использовать для подачи сигналов адаптивного управления.

Если входов/выходов, представленных на базовом блоке недостаточно, дополнительно могут быть подключены внешние модули расширения ввода/вывода PL 510 (рис. 5.3). Они состоят из базового модуля и от одного до восьми модулей ввода/вывода. Доступны базовые модули для модулей на 4, 6 или 8 слотов. Напряжение питания базового модуля 24 В постоянного тока. Потребляемая мощность около 20 Вт.



Рис. 5.3. Внешняя модульная система ввода/вывода PL 510

Набор модулей ввода/вывода состоит из одного модуля с дискретными входами/выходами и одного аналогового модуля. Модуль PLD 16-8 – модуль ввода/вывода с 16 дискретными входами и 8 дискретными выходами. Нагрузочная способность зависит от количества задействованных на одном модуле выходов: 2 выхода по 2А каждый, 4 выхода по 1А каждый или 8 выходов по 0,5А каждый.

Аналоговый модуль PLA 4-4 – модуль с 4 аналоговыми входами для РТ 100 термисторов и 4 аналоговыми входами на ± 10 В.

Один дискретный вход ПЛК способен принимать один бинарный электрический сигнал, описываемый двумя состояниями – включен или выключен. Все дискретные входы (общего исполнения) рассчитаны на прием стандартных сигналов с уровнем 24В постоянного тока. Типовое значение тока одного дискретного входа составляет около 10 мА.

Аналоговый электрический сигнал отражает уровень напряжения или тока, соответствующий некоторой физической величине, в каждый момент времени. Это может быть температура, давление, вес, положение, скорость, частота и т. д. Поскольку ПЛК является цифровой вычислительной машиной, аналоговые входные сигналы обязательно подвергаются аналого-цифровому преобразованию (АЦП). Модули аналогового ввода являются многоканальными. Входной коммутатор подключает вход АЦП к необходимому входу модуля.

5.4 Параметры регулирования процесса резания в адаптивных системах

В качестве параметра регулирования в адаптивных системах часто используют какой-либо силовой параметр резания (крутящий момент, мощность, силы резания), тепловые явления, вибрации.

Многочисленные технологические испытания показали, что обработка деталей с использованием оптимальных температур резания позволяет значительно увеличить размерную стойкость инструмента, получить

минимальные для выбранных условий силы резания, шероховатость поверхности, глубину и степень наклепа, а также наиболее стабильное и равномерное распределение остаточных напряжений в различных точках обрабатываемой поверхности. Опыты [8] с одновременным измерением тангенциальной составляющей силы резания P_z , температуры резания θ , относительного поверхностного радиального износа $h_{o,u}$ и высоты неровностей R_z показали, что моментам стабилизации силы резания, когда она рассматривается функцией скорости резания при постоянных значениях глубины резания и подачи, соответствуют минимумы кривых относительного износа и высоты неровностей и, следовательно, оптимальные температуры резания. Установлено, что оптимальному резанию соответствуют оптимальная температура θ_0 и минимальное или минимально-стабилизированное значение силы резания P_{zmin} [8].

Для измерения температуры в зоне резания можно использовать радиационный пирометр — прибор для бесконтактного измерения температуры, оценивающий температуру посредством пересчитанного показателя мощности теплового излучения. Также можно использовать метод естественной термопары, элементами которой являются режущий инструмент и обрабатываемая деталь, а горячим спаем — поверхность касания резца и детали, либо искусственной термопары — у которой оба элемента искусственно вводятся в инструмент или заготовку для измерения температуры.

5.5 Управление скоростью подачи по силе резания

Разработанная система, предназначенная для автоматического поддержания заданного значения усилия резания при продольном точении на тяжелых токарных станках с целью получения максимальной производительности обработки при исключении перегрузок режущего инструмента. Это стабилизирующая система автоматического регулирования скорости подачи, состоящая из следующих частей (рис. 5.4): датчика усилия резания 1 тензометрического типа, устройства сравнения 2, устройства задания

номинального усилия резания 3, пропорционального или пропорционально-интегрального регулятора 4, электронного аналога инерционного элемента с управляемой постоянной времени 5, и ограничивающего устройства 6. Выход последнего элемента является управляющим сигналом для привода продольной подачи 7.

Система работает следующим образом. Датчик 1 измеряет текущее значение силы резания, которое сравнивается с установленным номинальным значением для выбранного инструмента. В случае отклонения текущего значения силы резания от заданного значения, которое имеет место вследствие действия различных факторов (неравномерность припуска, неравномерность свойств материала изделия и т.п.), регулятор 4 корректирует сигнал задания скорости подачи до тех пор, пока не будет получено равенство текущего и заданного значения силы резания в установившемся режиме.

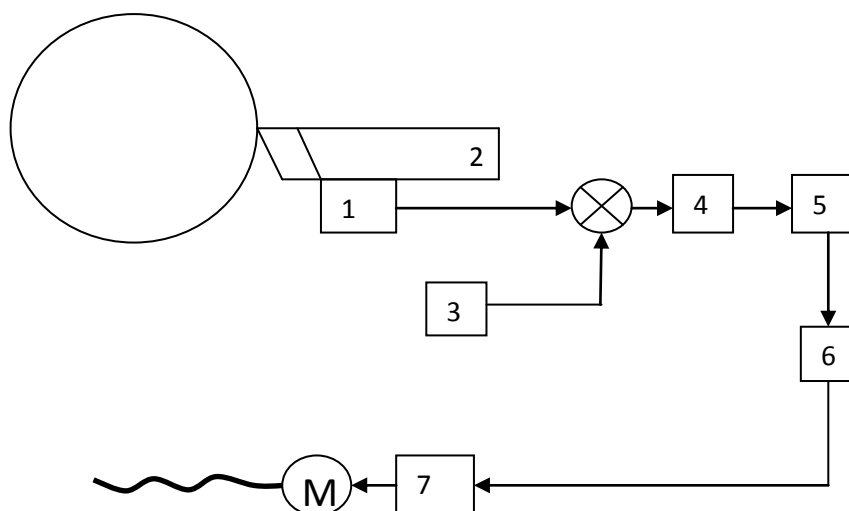


Рис. 5.4. Структурная схема системы оптимального управления скоростью подачи по усилию резания

Адаптивный инерционный элемент 5 необходим для обеспечения устойчивости системы регулирования при различных скоростях вращения заготовки. С точки зрения теории автоматического управления привод подачи по параметру скорости подачи представляет собой типичный инерционный

элемент, а процесс удаления стружки в течение одного оборота заготовки на зависимость усилия резания от скорости подачи может быть представлено более сложной структурой, содержащей помимо прочего элемент чистой задержки сигнала во времени. Последовательное соединение рассмотренных элементов делает систему неустойчивой и приводит к возникновению автоколебаний скорости подачи. Устойчивость системы обеспечивается в случае, когда постоянная времени привода подачи равна или больше периода вращения заготовки. Дополнительный инерционный элемент 5 обеспечивает это равенство на разных частотах вращения шпинделя, одновременно обеспечивает максимальное быстродействие системы.

Для анализа устойчивости предложенной системы, а также для оценки ее производительности, и реакции на быстро меняющиеся возмущения была построена динамическая модель системы для моделирования в пакете Simulink Matlab (рис. 5.5).

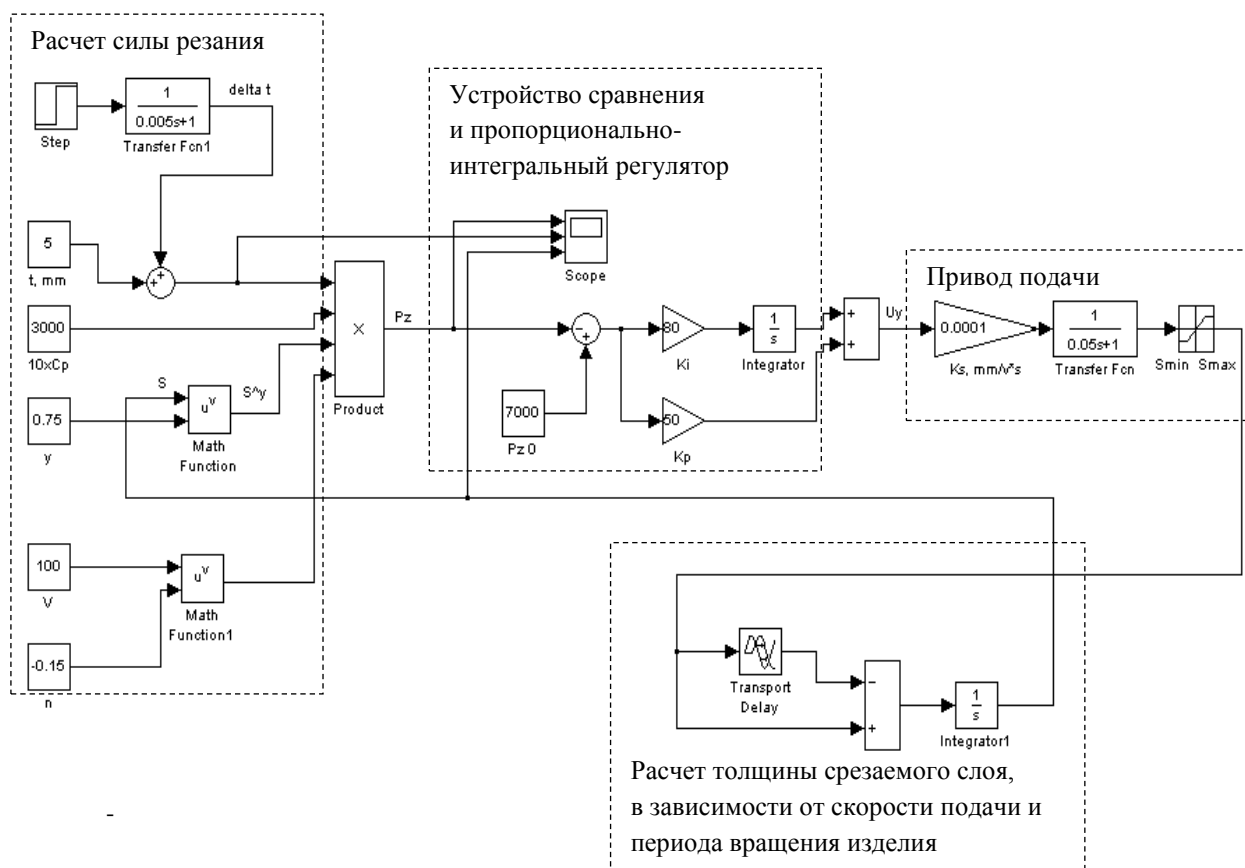


Рис. 5.5. Динамическая модель системы

На рис. 5.6 приведены графики переходного процесса, описывающие реакцию устоявшейся системы на быстро меняющиеся возмущения. Под быстроменяющимся возмущением понимаем изменение любого входного параметра системы (в модели это значение глубины резания) за время, меньше постоянной времени привода подачи, или изменение по гармоничным законам с частотой большей, чем частота среза привода подачи. На рисунке приведены аналогичные графики для случая медленного возмущения, т.е. возмущения сигналом с частотой или скоростью изменения, которое попадает в полосу пропускания привода подачи.

При моделировании были применены следующие значения параметров:

- постоянная времени привода подачи - 3с;
- период вращения шпинделя - 1с (частота вращения 60 об/мин);
- параметры модели силы резания – согласно случаю продольного точения конструкционной стали;
- глубина резания до возмущения - 5 мм.
- глубина резания после возмущения - 8 мм.

В первом случае изменение глубины резания происходит с постоянной времени 0,01 с, а во втором – с постоянной времени 5 с.

Из графиков (рис. 5.7) видно, что в случае медленного возмущения степень неравномерности силы резания составляет около 10% (при изменении глубины резания на 60%) и уменьшается с уменьшением скорости возмущения. При быстром возбуждении система эффективна только после переходного процесса, а в течение переходного процесса перегрузки инструмента полностью определяется степенью возмущения.

Таким образом, систему можно считать работоспособной и эффективной на черновой обработке для скоростей возмущений, попадающих в полосу пропускания привода подачи, т.е. когда постоянная времени привода подачи меньше постоянной времени процесса возмущения. К таким возмущениям относятся, например, колебания припуска в продольном сечении заготовки.

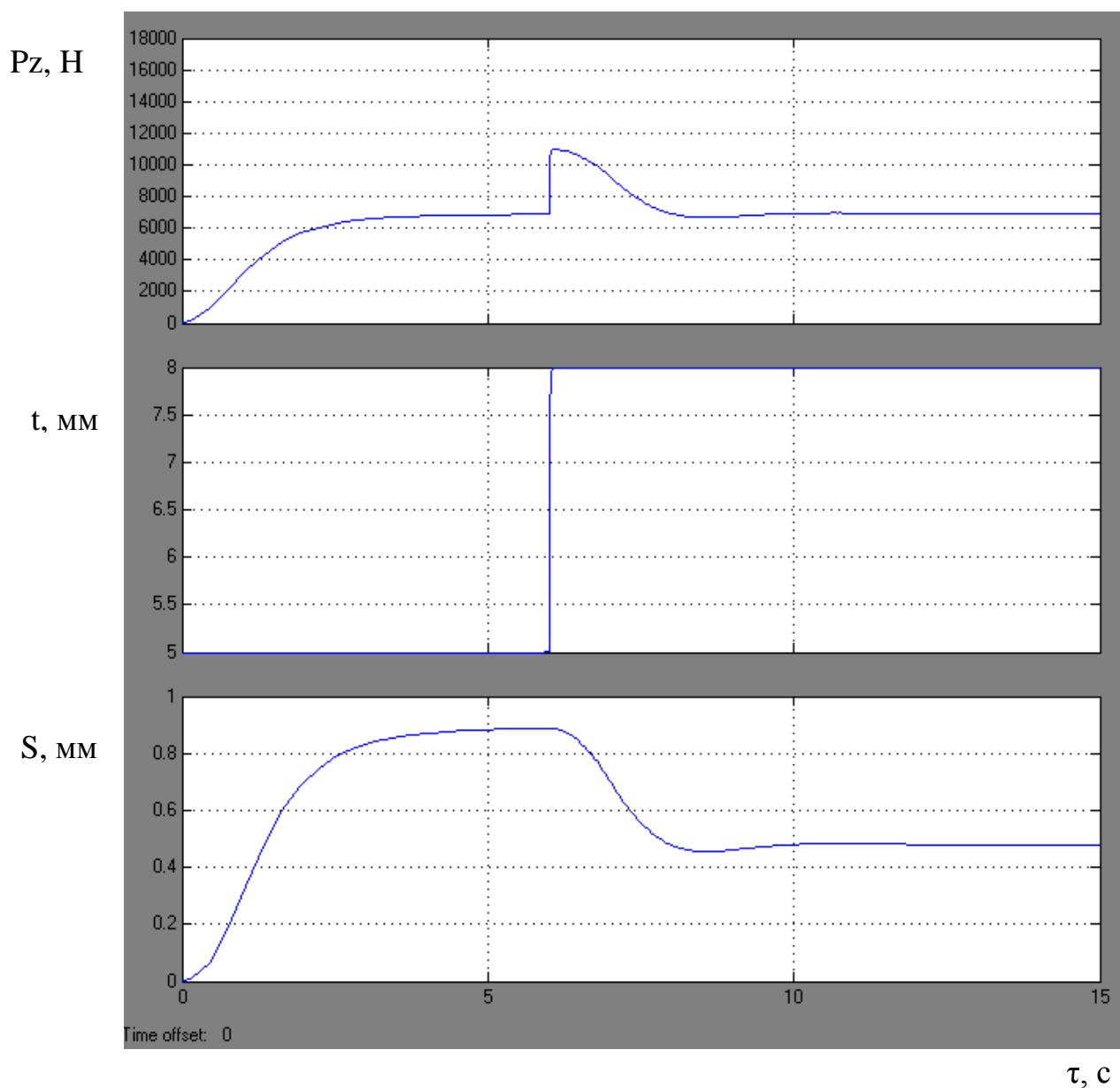


Рис. 5.6. Переходной процесс при быстром возмущении

Результаты моделирования разработанной системы позволяют использовать ее в приводах подач тяжелых токарных станков при черновой обработке деталей тяжелого машиностроения.

Таким же образом могут быть разработаны алгоритмы работы оптимальной системы адаптивного управления с включением критериев: себестоимость обработки, производительность, точность, качество, надежность системы и др.

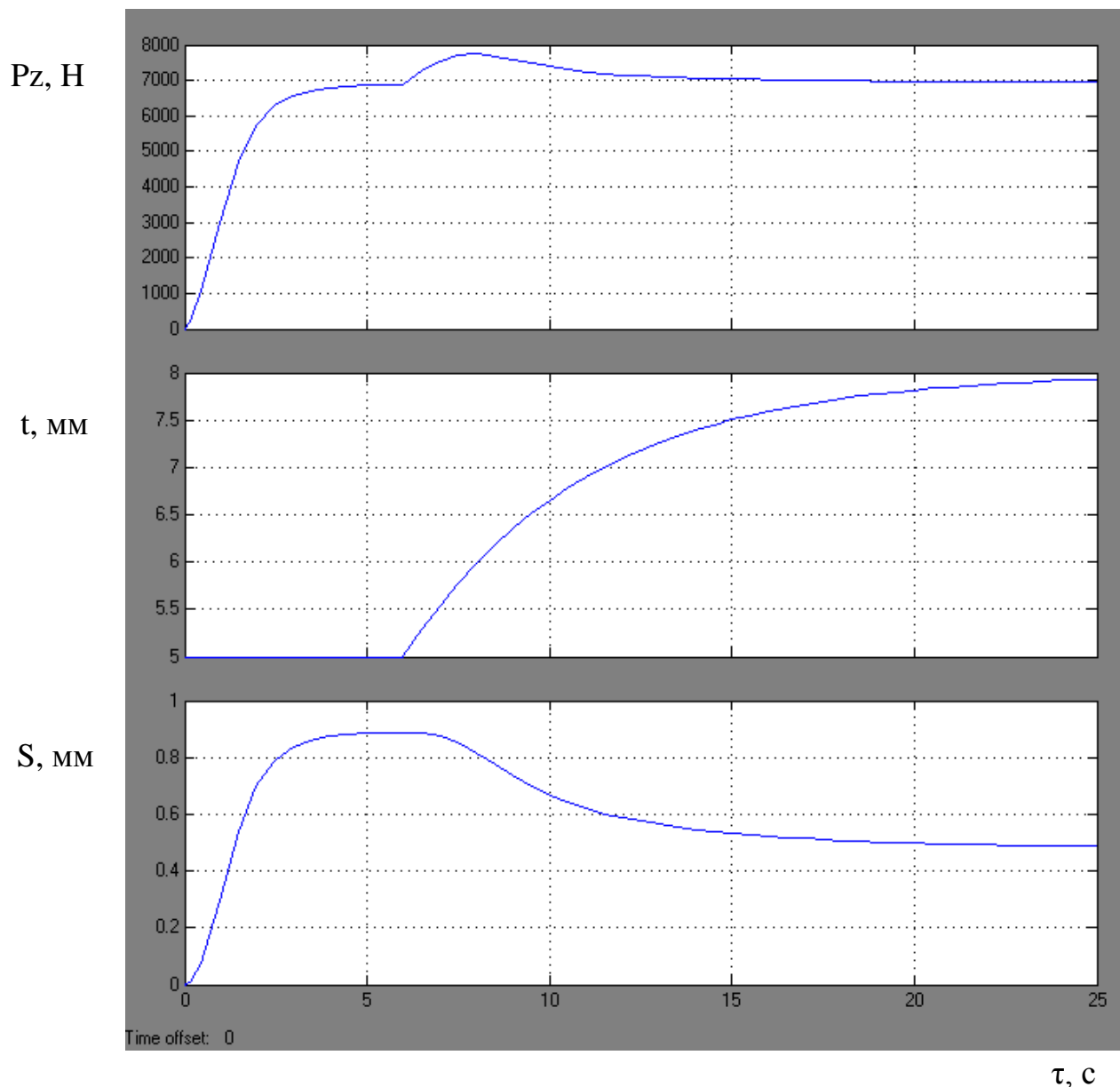


Рис. 5.7. Переходной процесс при медленном возмущении

Структура адаптивной технологической системы должна иметь высокую степень охвата обратными связями: по относительному положению и траекториям формообразующих движений элементов системы; их физическим состояниям и возмущающим воздействиям.

Оптимальное адаптивное регулирование базируется на полной динамической исходной модели процесса резания.

Оптимизация осуществляется во время всего процесса обработки и гарантирует оптимальное проведение процесса резания. Постоянное

определение мгновенного положения оптимальной рабочей точки в соответствии с мгновенным состоянием процесса резания осуществляется постоянным сравнением актуальных значений характерных величин параметров.

Для реализации системы адаптивного регулирования скорости подачи с обратной связью по силе резания на станках с ручным управлением требуется установить бесступенчато регулируемый привод подачи (если он не предусмотрен в базовой конструкции станка), систему регулирования и датчик силы резания. На станках с ЧПУ бесступенчато регулируемый привод подачи уже имеется, система регулирования может быть реализована программно на базе программируемого контроллера электроавтоматики, но необходимость в применении датчика силы резания остается. Известны попытки косвенного измерения силы резания через ток двигателя привода главного движения, однако этот способ характеризуется крайне низкой точностью, большой инерционностью и необходимостью учитывать диаметр обрабатываемой детали, который для токарной обработки является переменной величиной.

Еще одним существенным недостатком этих систем является их неэффективность при резком изменении силы резания, например при ступенчатом изменении припуска, или при наличии в заготовке включений повышенной твердости. Он проявляется в том случае, если скорость повышения силы резания превышает скорость изменения подачи. Режущий инструмент в таких случаях, как правило, ломается, т.к. система не успевает уменьшить подачу до того, как сила резания превысит максимально допустимое значение.

Кроме того, даже при обеспечении высокого быстродействия привода подачи, система будет работоспособна, если время повышения силы резания до максимально допустимого значения и время разгона-торможения привода подачи превышает время нескольких оборотов заготовки при токарной обработке, или время прохода нескольких зубьев при фрезерной обработке.

В противном случае система теряет устойчивость и входит в режим автоколебаний.

Эта проблема особенно актуальна на тяжелых токарных станках, где частота вращения заготовки измеряется десятками и единицами оборотов в минуту, а время разгона-торможения современных приводов подачи – сотнями и десятками миллисекунд.

Это показано на примере модельных исследований, проведенных с помощью пакета моделирования динамических систем Matlab Simulink.

На рисунке 5.8 представлена динамическая модель типичной системы адаптивного регулирования скорости подачи токарного станка линейного типа с пропорционально интегрально дифференциальным регулятором (ПИД регулятором). Этот тип регулятора был выбран, как обеспечивающий наилучшее качество управления.

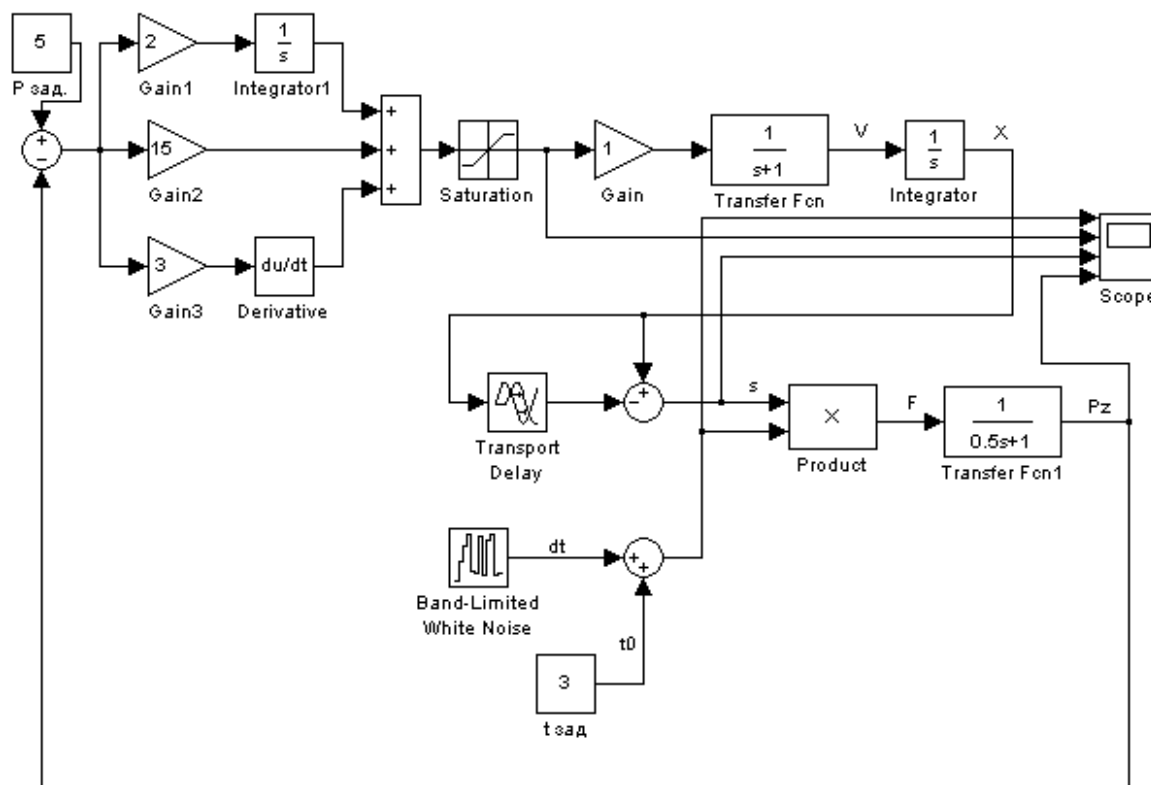


Рис. 5.8. Динамическая модель системы адаптивного регулирования скорости подачи

Значение константы $P_{зад.}$, которая является устройством для задания уровня силы, на котором ее требуется стабилизировать, подается на сравнивающее устройство, на второй вход которого поступает фактическое значение силы резания (измеряемое датчиком). Сигнал разности поступает на вход ПИД регулятора, который образован элементами *Gain1*, *Gain2*, *Gain3*, *Integrator1*, *Derivative* и трехвходовым сумматором. Элемент ограничения *Saturation* задает пределы изменения скорости подачи. Далее полученный управляющий сигнал подается на вход привода подачи, который в данной модели представлен инерционным звеном первого порядка *Transfer F_{cn}*. После этого звена получаем текущее значение скорости подачи V , а после его интегрирования по времени элементом *Integrator* – текущее значение координаты инструмента X в направлении рабочей подачи.

После умножения подачи на глубину резания получаем площадь срезаемого слоя F , которая затем умножается на передаточную функцию процесса резания *Transfer F_{cn1}* для получения значения силы резания P_z . Передаточная функция процесса резания представлена инерционным звеном первого порядка и моделирует плавное изменение силы резания при резком изменении площади срезаемого слоя, обусловленное процессами накопления и релаксации упругих деформаций в эквивалентной упругой системе станка.

Для простоты в модели не учитывается влияние на силу резания скорости резания в виду ее малости, а для некоторого диапазона скоростей резания и обрабатываемых материалов – полного отсутствия этой зависимости.

Результаты моделирования выводились на четырехканальный осциллограф. Значения каналов (сверху вниз): глубина резания, управляющий сигнал привода подачи, подача на оборот (толщина срезаемого слоя), сила резания. Значения параметров системы выбирались абстрактными, поскольку задачей моделирования было только показать наличие областей устойчивости и неустойчивости при изменении частоты вращения заготовки, а сами параметры системы на практике могут изменяться в весьма широких пределах в зависимости от типа станка и условий резания.

Было проведено два опыта. В первом параметры системы выбраны такими, чтобы обеспечивалась устойчивость процесса. Результаты этого эксперимента представлены на рисунке 5.9.

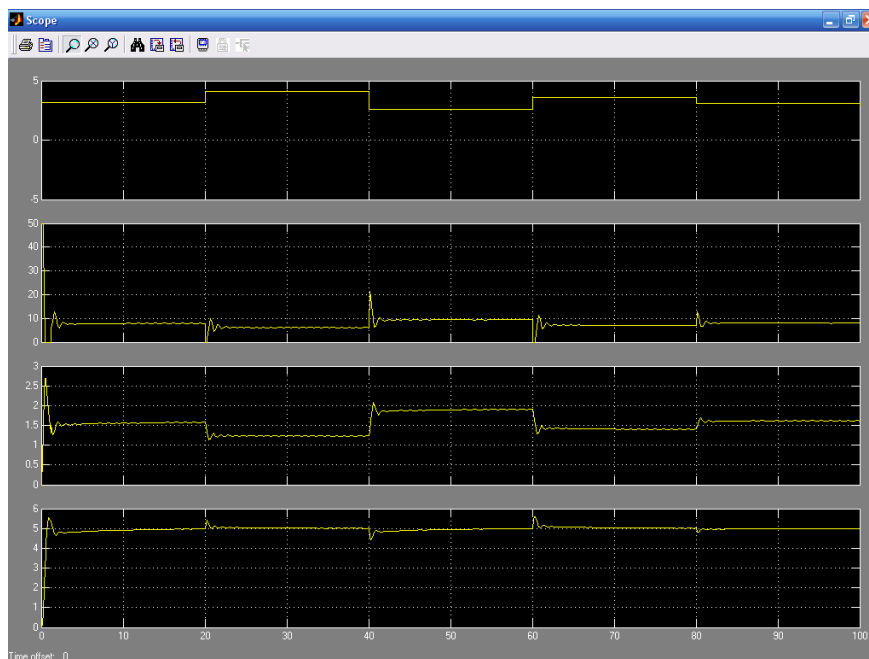


Рис. 5.9. Результаты моделирования первого опыта

Как видно из четвертого графика сила резания достаточно стабильна при существенном и резком изменении глубины резания. Небольшие всплески силы резания в моменты изменения глубины резания обусловлены тем, что постоянная времени привода подачи выбрана больше чем постоянная времени процесса резания, что соответствует подавляющему большинству практических случаев. Таким образом, при выбранном сочетании параметров система работоспособна и эффективна.

Во втором опыте было в пять раз увеличено время задержки в элементе *Transport delay*, что соответствует уменьшению частоты вращения заготовки в такое же число раз, а также была увеличена постоянная времени процесса резания, что соответствует уменьшению скорости резания при неизменной жесткости технологической наладки. Остальные параметры остались без изменений. Результаты второго опыта представлены на рисунке 5.10.

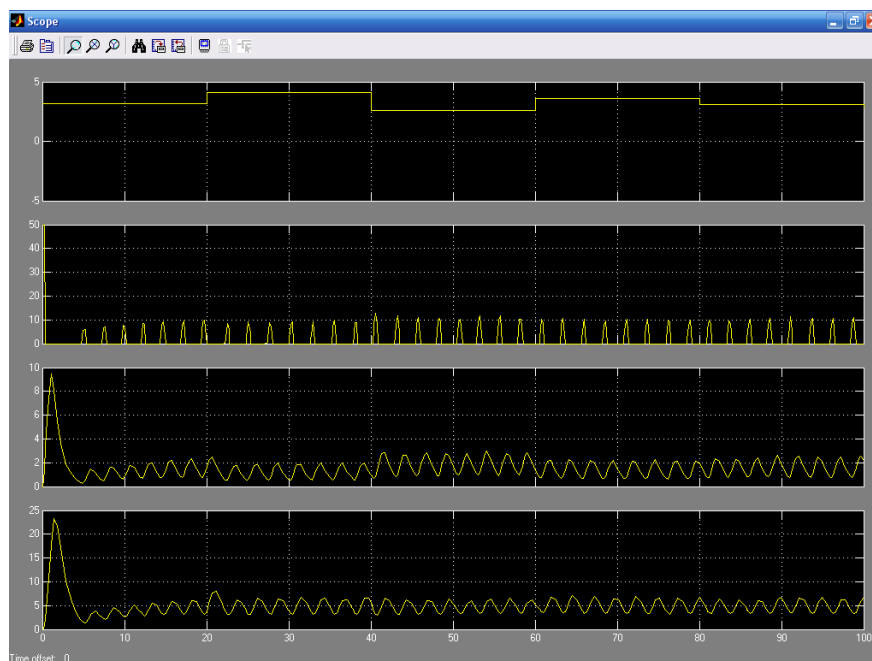


Рис. 5.10. Результаты моделирования второго опыта

Как видно из графиков, система сразу входит в режим автоколебаний, что неизбежно вызовет поломку режущего инструмента. Восстановить устойчивость и работоспособность системы при заданной частоте вращения можно путем соответствующего увеличения постоянной времени привода подачи. Но это противоречит требованиям к контурной точности привода подачи станков с ЧПУ, т.к. для обеспечения контурной точности потребуется пропорционально снижать рабочую скорость подачи, а следовательно и производительность, в результате применение такой системы теряет смысл.

Рассмотренная система автоматического регулирования является нелинейной в силу нелинейности самого процесса резания (наличия задержки между изменением скорости подачи и соответствующим изменением толщины срезаемого слоя), и устранить эту нелинейность не представляется возможным. Для решения поставленной задачи предлагается перейти от аналогового к алгоритмическому способу управления скоростью подачи. При этом в рассмотренной динамической модели вместо регулятора помещается логический блок, реализующий требуемый алгоритм управления.

Для защиты инструмента от перегрузок при одновременном обеспечении максимальной производительности предлагается следующий алгоритм.

1. Процесс врезания выполняется с некоторой минимальной скоростью подачи V_{min} . Эта скорость выбирается в зависимости от конкретных условий обработки, с таким расчетом, чтобы сила резания не превысила максимально допустимую для режущего инструмента величину при максимально возможном увеличении припуска и твердости заготовки.

2. В течение одного полного оборота заготовки выполняется измерение силы резания и находится ее максимальное значение.

3. Вычисляется требуемая скорость подачи по формуле:

$$V = V_{min} \cdot ([P_z]/P_z)^{1/y}, \quad (5.1)$$

где $[P_z]$ – максимально допустимая сила резания, ограниченная прочностью режущего инструмента; P_z – максимальное измеренное за один оборот заготовки значение силы резания; y – показатель степени, характеризующий влияние подачи на силу резания для данных условий обработки [80].

4. Устанавливается рассчитанное значение скорости подачи и в течении следующего оборота контролируется сила резания.

Если в течении оборота сила резания превысит значение $[P_z]$ более чем на установленный допуск – производится максимально быстрое снижение скорости подачи до значения V_{min} , после чего процесс повторяется с пункта 2.

Если максимальное за текущий оборот значение силы резания оказалось в пределах допуска, то значение скорости подачи остается неизменным и повторяется данный пункт алгоритма.

Если максимальное за текущий оборот значение силы резания оказалось меньше нижней границы поля допуска, то скорость подачи для следующего оборота корректируется по формуле:

$$V_{i+1} = V_i \cdot ([P_z]/P_z)^{1/y}, \quad (5.2)$$

где V_i – скорость подачи на текущем обороте заготовки.

После чего снова повторяется данный пункт алгоритма.

Второй вариант алгоритма управления скоростью подачи представлен на рис. 5.11. В этом варианте применен принцип интегрального регулирования вместо расчетной модели, в результате система имеет меньшее быстродействие, но ее работоспособность не зависит от точности экспериментального определения показателя степени y в расчетной модели, а следовательно и от геометрии режущего инструмента для конкретных условий обработки.

Приведенный алгоритм по сути является алгоритмически реализованным гибридным регулятором, который содержит пропорционально-интегральный регулятор, поддерживающий скорость подачи на оптимальном уровне, и дискретный ограничитель, который резко снижает скорость подачи до минимального значения при превышении силой резания предельного значения. Потеря устойчивости при таком способе регулирования исключается, поскольку периоды времени, на которых происходит изменение скорости подачи, оказываются строго синхронизированы с вращением заготовки.

Характеристики, ожидаемые от такой системы следующие:

1. Точность поддержания скорости подачи на оптимальном уровне в установившемся режиме за счет интегрирования ошибки по времени (корректировка скорости на каждом обороте заготовки в п. 4 алгоритма) определяется только точностью привода подачи по скорости и точностью измерения силы резания.

2. Быстродействие системы при повышении скорости подачи от минимального значения до оптимального зависит от точности подбора показателя степени y и в идеальном случае составляет один оборот.

3. Быстродействие при экстренном снижении скорости подачи определяется только быстродействием привода подачи.

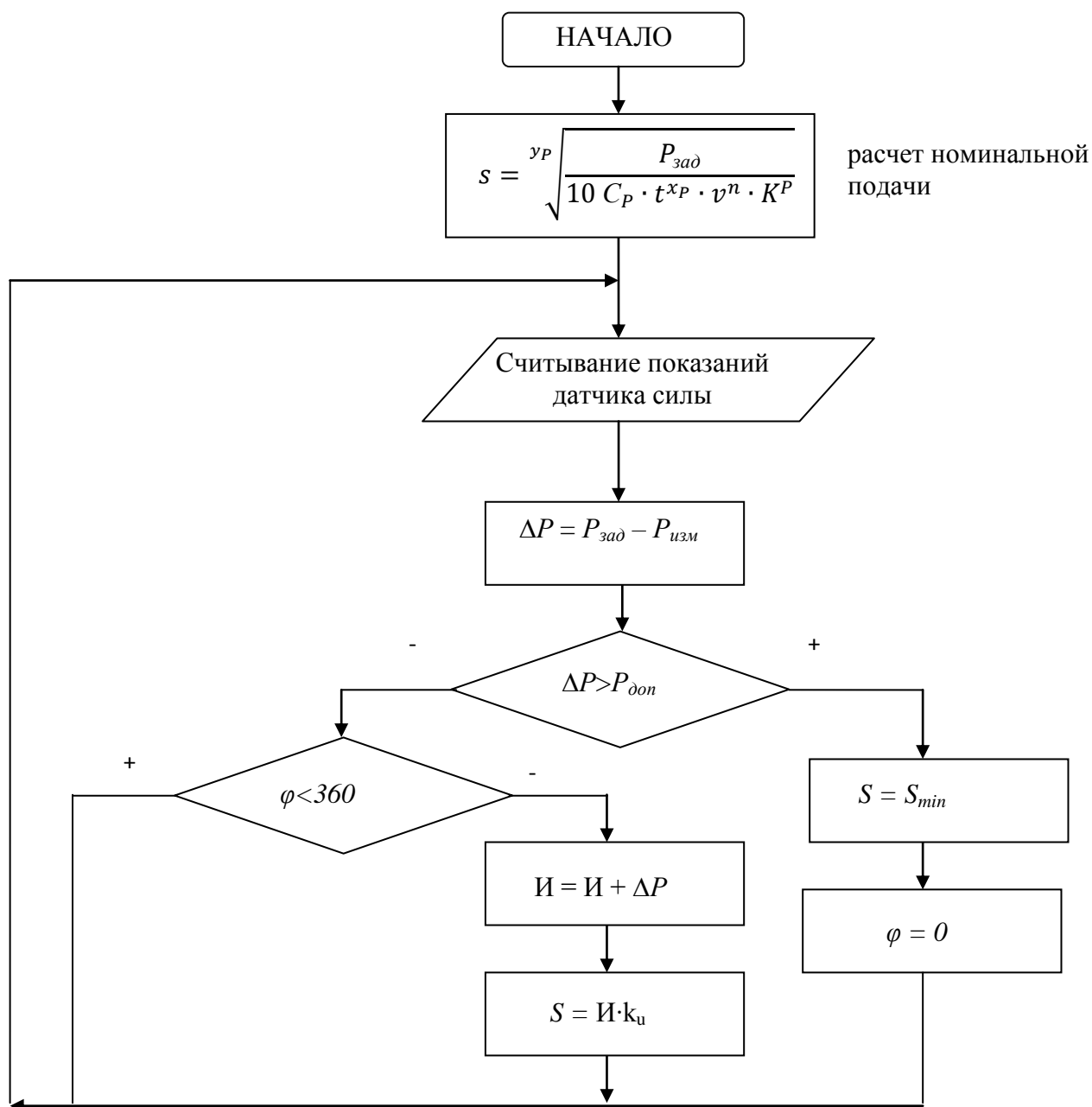


Рис. 5.11. Алгоритм работы системы автоматического регулирования скорости подачи тяжелого токарного станка

В отношении третьего параметра следует заметить, что даже при мгновенной остановке движения подачи толщина срезаемого слоя и следовательно сила резания, снижаются не мгновенно, а по линейному закону в течении ровно одного оборота заготовки.

Поэтому любая система адаптивного регулирования скорости подачи и защиты инструмента не может быть эффективной, если область увеличенного припуска на заготовке (например, прилив на отливке) или повышенной твердости (например, ползун на перетачиваемом колесе железнодорожного вагона) имеет резкие границы, как в продольном, так и в азимутальном направлениях, и во время обработки граница этой области совпадает с границей между витками подачи.

Предохранить инструмент от поломки в этом случае возможно только уменьшив подачу на подходе к опасному участку. Датчик силы резания для этой цели не подходит, для этого требуется некий источник информации, способный сигнализировать о возможном повышении силы резания с некоторым опережением. Поскольку повышение силы резания может быть вызвано несколькими причинами, то для каждой причины потребуется отдельный специфический датчик. Это сделает систему неуниверсальной и непрактичной. Учитывая все вышесказанное, не имеет смысла снижать время разгона-торможения привода подачи до величины, меньшей чем время одного оборота заготовки на максимальной частоте вращения шпинделя применительно к разработке предлагаемой системы.

В отличие от аналоговых систем, где на станок требуется устанавливать дополнительное оборудование, предлагаемая система может быть реализована исключительно программным способом на базе контроллера электроавтоматики станка с ЧПУ. В большинстве современных систем ЧПУ контроллеры электроавтоматики являются встроенными и реализованы программным или программно-аппаратным способом. Они имеют большой запас вычислительной мощности для реализации дополнительных функций и возможности работы с аналоговыми входными и выходными величинами. Единственной сложностью является датчик силы резания. Наилучшим вариантом с точки зрения точности и быстродействия был бы отдельный датчик, например, тензометрический, но это сопряжено с необходимостью изменения конструкции узлов станка для встройки датчика и потерей

жесткости. При некотором ухудшении характеристик силу резания можно измерять косвенно через токи, потребляемые двигателем главного движения или двигателем подачи, с последующим пересчетом по известным зависимостям.

5.6 Выбор средств измерения для практической реализации предложенной системы

Датчик угла поворота (рис. 5.12) – устройство, предназначенное для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала) в электрические сигналы, позволяющие определить угол его поворота. Датчик устанавливается непосредственно на шпиндель станка, благодаря чему не возникает никаких дополнительных погрешностей при измерении положения. Кроме того, в большинстве станков, оснащенных системой ЧПУ, такой датчик уже имеется в штатной конфигурации.



Рис. 5.12. Датчик угла поворота

Датчик усилия резания – магнитоупругий датчик. Магнитоупругий датчик или магнестрикционный датчик (рис. 5.13) – измерительный преобразователь механических усилий (деформаций) или давления в электрический сигнал. Действие магнитоупругого датчика основано на использовании зависимости магнитных характеристик некоторых ферромагнитных материалов от механических напряжений в них.

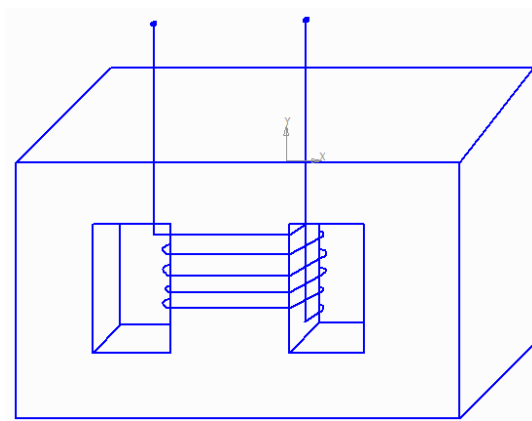


Рис. 5.13. Магнитоупругий датчик

Рабочий элемент магнитоупругого датчика – магнитопровод, на котором размещены одна или несколько обмоток, включаемых в измерительный мост (рис. 5.14).

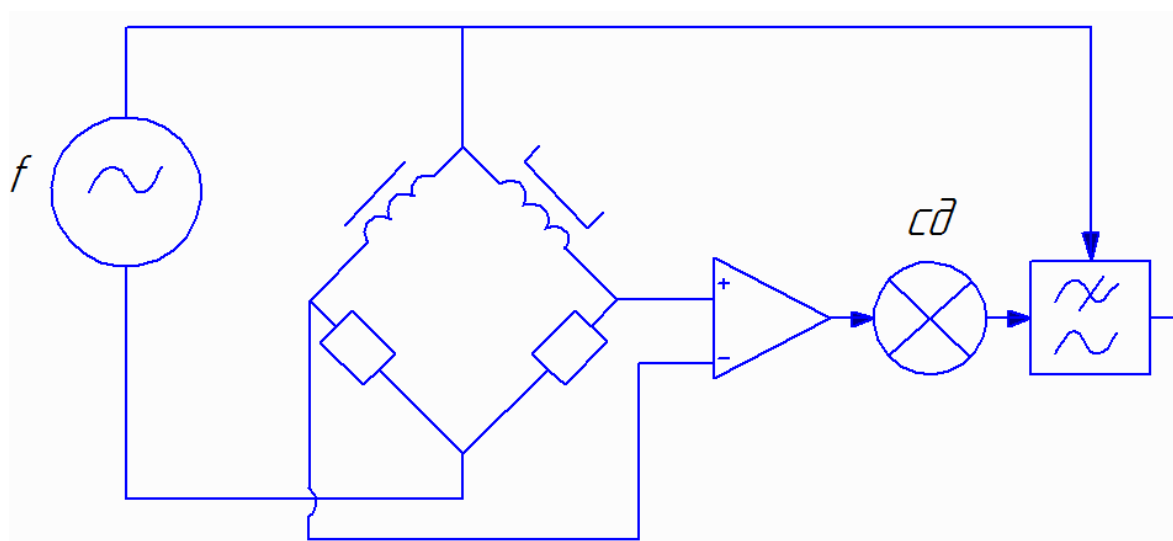


Рис. 5.14. Схема включения магнитоупругого датчика

Магнитопровод магнитоупругого датчика закрепляют между державкой резца и резцедержкой в направлении действующих усилий. Изменения магнитных характеристик, в частности магнитной проницаемости материала магнитопровода, проявляются в изменении индуктивности или взаимоиндуктивности обмоток.

Магнитоупругий датчик наиболее целесообразно применять при измерениях усилий, когда не допускается существенное снижение жесткости системы при установке датчика.

5.7 Разработка системы адаптивного управления скоростью резания для обеспечения оптимального значения температуры в зоне резания

Одной из важнейших задач при обработке деталей на станках с ЧПУ в условиях серийного производства является обеспечение требуемой надежности режущего инструмента. Этот вопрос актуален также и для единичного производства при обработке ответственных крупногабаритных изделий на тяжелых станках, когда период стойкости режущего инструмента соизмерим с временем его работы при обработке одного изделия, а иногда и со временем одного прохода.

Основными факторами, снижающими надежность прогнозирования периода стойкости инструмента, являются внезапные отказы типа поломок, сколов, выкрашиваний и т.п. Затупление режущей кромки инструмента вследствие абразивного и адгезионного износа – процесс, как правило, хорошо прогнозируемый, и на современном уровне при условии отсутствия внезапных отказов имеется возможность прогнозирования периода стойкости с точностью 15...20%.

Однако достаточно часто инструмент испытывает повреждения в виде микровыкрашиваний режущей кромки. В основном это имеет место при обработке крупногабаритных заготовок, полученных методом литья иковки, когда высока вероятность наличия твердых включений. Режущий инструмент при этом в большинстве случаев сохраняет режущие свойства, однако нарушение геометрии режущей кромки приводит к существенному повышению температуры в зоне резания. Если до этого инструмент работал на оптимальных режимах, то такое повышение температуры неминуемо приводит к появлению пластических деформаций режущей кромки и увеличению радиуса ее

округления. Это в свою очередь дополнительно повышает мощность и температуру в зоне резания и далее процесс протекает лавинообразно до полного отказа инструмента. В результате, инструмент, который с небольшим повреждением мог бы доработать до окончания технологической операции, разрушается, провоцируя зачастую неисправимое повреждение дорогостоящей заготовки.

Данная проблема может быть решена путем снижения скорости резания до такого уровня, при котором температура в зоне резания не будет превышать максимально допустимое значение для данного инструментального материала. Такой подход применялся многократно различными авторами, например [77, 100]. Учитывая невозможность предсказания требуемой величины снижения скорости резания, практически во всех случаях задача решалась применением системы автоматического регулирования. При этом многими авторами были получены положительные практические результаты. Тем не менее, практического внедрения в производстве эти системы не получили. В первую очередь, по причине сложности аппаратной части и ее обслуживания. Во-первых, установка такой системы на серийные станки зачастую требовала их глубокой модернизации, а во вторых, на тот момент не имелось достаточно точных и надежных методов и средств измерения температуры в зоне резания.

Ситуация изменилась с появлением систем ЧПУ нового поколения с интегрированным программно реализованным контроллером электроавтоматики (PLC), который имеет значительный запас вычислительной мощности и позволяет помимо своих непосредственных задач реализовать дополнительные задачи управления в режиме реального времени. При этом, практически во всех современных системах ЧПУ помимо дискретных входов имеются и аналоговые входы с разрешением 12...16 бит, используемые обычно для контроля параметров приводов подач. Эти входы вполне могут быть использованы для контроля температуры.

Кроме того, многими производителями налажен выпуск бесконтактных датчиков температуры различного назначения, основанных на

пирозлектрическом эффекте. Характеристики этих датчиков позволяют бесконтактно измерять температуру поверхности твердого тела на расстоянии в несколько сот миллиметров на площадке размерами в единицы миллиметров с точностью до десятых долей градуса по инфракрасному излучению. При этом быстродействие исчисляется десятками миллисекунд. С помощью такого датчика можно косвенно измерять температуру режущей кромки по температуре стружки. Для случая токарной обработки датчик удобнее всего установить на суппорте на безопасном расстоянии от резца, таким образом, чтобы его оптическая ось была параллельна передней поверхности резца и перпендикулярна режущей кромке, а зона «видимости» датчика попадала на поверхность стружки, контактирующую с передней поверхностью резца, как можно ближе к режущей кромке. При таком расположении обеспечивается наименьшая вероятность затенения зоны «видимости» датчика остывающими фрагментами стружки, а температура указанной поверхности теоретически наиболее близка к температуре режущей кромки.

Применение рассмотренного подхода позволит в некоторых случаях получить еще один положительный эффект. Помимо повышения надежности работы режущего инструмента управление скоростью резания по температуре в зоне резания позволяет повысить производительность обработки. Учитывая сравнительно невысокую точность существующих методик назначения режимов резания, фактическая скорость зачастую оказывается ниже оптимальной, т.е. той, при которой обеспечивается максимальная производительность при заданном периоде стойкости инструмента. Причина этого в первую очередь заключается в разбросе свойств обрабатываемого материала и параметров микрогеометрии режущего инструмента, в частности радиуса округления режущей кромки. При использовании системы автоматического регулирования становится возможным поддерживать скорость резания на оптимальном значении на всех стадиях износа инструмента, т.е. с учетом того, что это оптимальное значение изменяется в течение периода стойкости инструмента.

Для практической реализации такой системы необходимо адаптировать алгоритмы работы ранее разработанных аналоговых систем автоматического регулирования для реализации программным способом на микропроцессорной аппаратной базе. На рисунке 5.15 представлена структурная схема простой одноконтурной аналоговой системы автоматического регулирования оптимального типа.

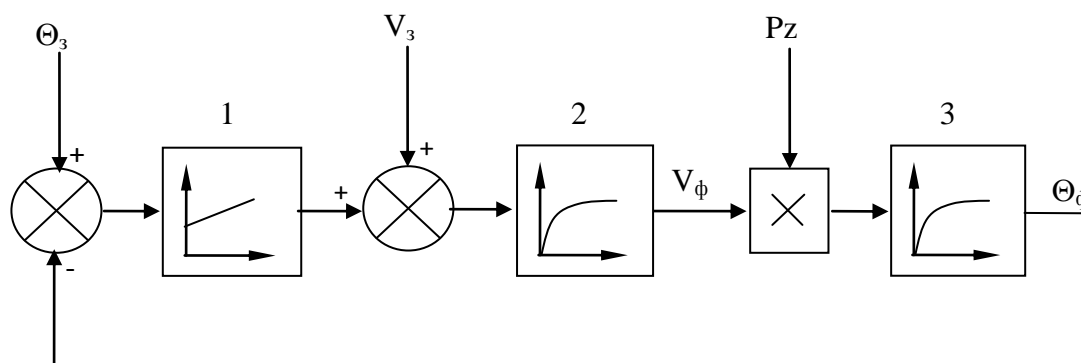


Рис. 5.15. Структурная схема аналоговой системы

Блок 1 (рис. 5.15) представляет собой пропорционально-интегральный регулятор, формирующий сигнал управления скоростью резания согласно следующему уравнению:

$$V = V_3 + k_n(\Theta_3 - \Theta_\phi) + k_u \int (\Theta_3 - \Theta_\phi) dt, \quad (5.3)$$

где V_3 – заданное значение скорости; k_n – коэффициент пропорциональной передачи; k_u – коэффициент интегральной передачи; Θ_3 – заданная (оптимальная) температура режущей кромки; Θ_ϕ – результат измерения температуры; dt – дифференциал времени.

Этот сигнал суммируется со значением скорости (V_3), заданным системой ЧПУ или иным источником и результат подается в качестве сигнала задания на регулируемый привод главного движения. Сам привод можно представить как инерционное звено первого порядка (блок 2, рис. 5.15).

Процесс нагрева режущей кромки инструмента в простейшем случае также может быть представлен как инерционное звено первого порядка (блок 3, рис. 5.15), для которого входной величиной служит мощность резания, а она в свою очередь вычисляется как произведение фактической скорости резания на составляющую силы резания P_z . Сила резания в данном случае является возмущающим фактором, поскольку при прочих равных условиях зависит от состояния режущей кромки инструмента. Из теории автоматического управления известно, что для подобных систем соответствующим выбором параметров звеньев может быть обеспечена устойчивость и апериодический переходный процесс во всем диапазоне возмущающих воздействий.

При практической реализации такая система имеет существенный недостаток, связанный с несовершенством способа измерения температуры. При попадании в зону «видимости» пирометрического датчика посторонних предметов, в частности элементов стружки и капель СОЖ, результаты измерения температуры будут существенно искажены в меньшую сторону. Если такие явления будут достаточно продолжительными (несколько секунд) то система будет отрабатывать повышение частоты вращения и оптимальная скорость резания может быть значительно превышена. Если же указанные помехи будут кратковременными, то, учитывая значительную инерционность привода главного движения, это создаст значительные динамические нагрузки на привод, что ухудшит и условия работы инструмента и точность обработки изделия.

Для устранения указанного недостатка, учитывая невозможность устранения указанных помех, система должна по-разному реагировать на повышение и понижение показаний пирометрического датчика. При возрастании результатов измерений температуры система должна снижать скорость резания с максимальным быстродействием, т.к. это возрастание может быть вызвано только реальным процессом в зоне резания и означает ухудшение состояния режущего инструмента или условий его работы. При понижении

сигнала от датчика температуры, прежде чем повысить частоту вращения шпинделя, система должна проанализировать сигнал от датчика на достаточно большом промежутке времени (несколько десятков секунд), исключая реакцию на кратковременные понижения температуры. И только по истечении этого промежутка времени, если температура не вернулась в установленное поле допуска, осуществлять медленное повышение частоты вращения шпинделя.

Реализация предложенных функций аналоговыми средствами принципиально возможна, однако приведет к неоправданному усложнению системы, в то время как реализация алгоритмическим способом на базе вышеупомянутого контроллера электроавтоматики будет достаточно простой и не потребует наращивания специальных аппаратных средств.

На рисунке 5.16 представлена блок-схема алгоритма, реализующего предложенный принцип управления.

На схеме приняты следующие обозначения:

$\Theta_{и}$ – величина сигнала от датчика температуры;

$\Theta_{опт}$ – оптимальное значение температуры для данного сочетания инструментального и обрабатываемого материалов, соответствующее максимальной стойкости инструмента;

$\Delta\Theta$ – рассогласование (ошибка) по температуре;

$\Delta\Theta_{max}$ – ширина поля допуска на отклонение измеренной температуры от оптимальной в меньшую сторону;

n – значение частоты вращения шпинделя для выдачи на привод главного движения;

$k_{п}$ – коэффициент пропорциональной передачи регулятора;

$k_{и1}$ – коэффициент интегральной передачи при регулировании в сторону уменьшения частоты вращения шпинделя;

$k_{и2}$ – коэффициент интегральной передачи при регулировании в сторону увеличения частоты вращения шпинделя;

Σ – переменная для численного интегрирования;

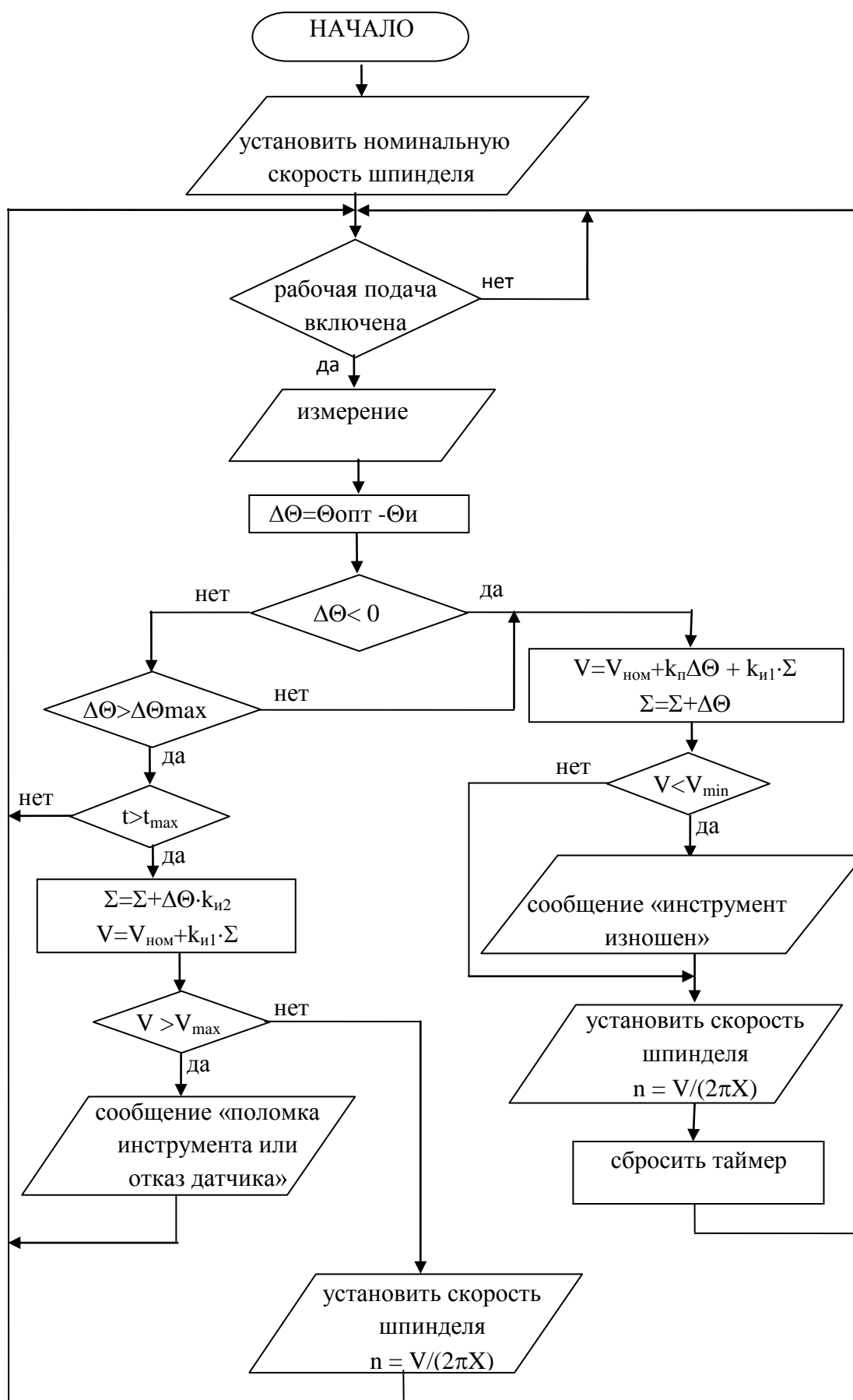


Рис. 5.16. Блок-схема алгоритма регулирования скорости резания для контроллера электроавтоматики

$V_{\text{ном}}$ – номинальное значение скорости резания, рассчитанное для данной технологической операции;

V_{min} – минимальное, предварительно заданное значение скорости резания, при котором превышение температурой оптимального значения трактуется системой как аварийное состояние инструмента или иные проблемы с процессом резания. Этим значением ограничивается минимальная скорость резания с целью исключения продолжения обработки изношенным инструментом.

V_{max} – максимальное, предварительно заданное, значение скорости резания, на достижение при которой оптимальной температуры может означать отсутствие процесса резания в следствии поломки инструмента, либо длительное блокирование зоны «видимости» датчика посторонними предметами. Этим значением ограничивается максимальная частота вращения во избежание повреждения инструмента при сбоях датчика;

t – текущее значение таймера;

t_{max} – время ожидания системы перед повышением скорости резания;

X – значение поперечной координаты инструмента (радиус обработки).

Для решения задачи корректировки скорости резания, с целью поддержания оптимальной температуры в зоне резания при простой оптимизации без функций диагностики состояния инструмента был разработан упрощенный алгоритм (рис. 5.17).

Данный цикл должен выполняться через строго фиксированный интервал времени, например, по прерыванию от таймера или в общем цикле программы PLC. Интервал времени запуска цикла влияет на выбор величины коэффициентов k_u и k_o .

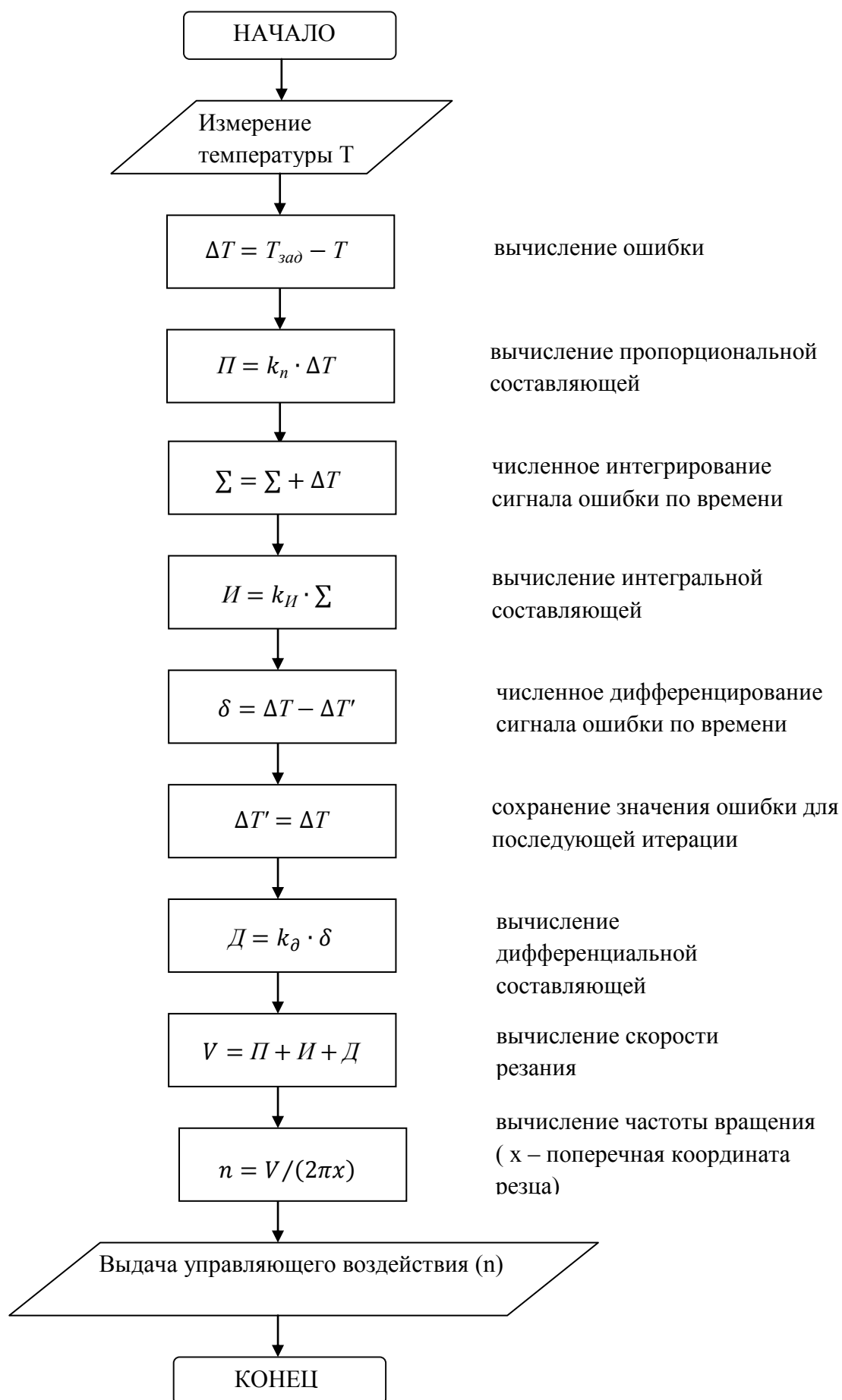


Рис. 5.17. Алгоритм корректировки скорости резания с целью поддержания оптимальной температуры в зоне резания

5.8 Оценка возможности реализации предложенного алгоритма на базе ПЛК системы управления Heidenhain MANUAL plus 620

Команды, управляющие PLC-контроллером, имеют следующую структуру (рис. 5.18):

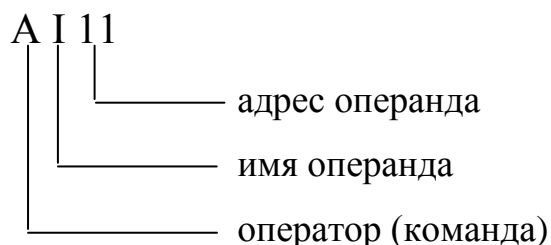


Рис. 5.18. Структура команды, управляющей PLC-контроллером

Команда состоит из оператора и операнда. Оператор указывает на операцию, которая должна быть выполнена. Он объясняет то, что должно быть сделано с операндом. Операнд указывает, какое содержимое памяти должно быть использовано на этой операции. Он обычно состоит из типа операнда и адреса операнда. Промежуточная память («накопитель») используется, если логические операции должны быть разделены на два операнда.

В качестве операндов могут использоваться как внутренние программные переменные, так и физические входы и выходы PLC с подключенными к ним датчиками и исполнительными органами, а также переменные NC (ЧПУ), такие как координаты рабочих органов, скорость вращения шпинделя, скорость подачи, характеристики инструмента и т.п.

Для работы с этими переменными предусматривается следующий набор действий (табл. 5.1; 5.2).

Для управления ходом выполнения программы предусмотрен развитый набор условных операторов совместно с командами сравнения (табл. 5.3).

Табл. 5.1. Арифметические и логические действия

+	сложение
-	вычитание
x	умножение
/	деление
MOD	остаток
A	И
AN	И НЕ
O	ИЛИ
ON	ИЛИ НЕ
XO	исключающее ИЛИ
XON	исключающее ИЛИ НЕ

Табл. 5.2. Операции сохранения и загрузки

L	загрузить
LN	загружать с инверсией
L-	загрузить в дополнительном (двоичном) коде
LB	загрузить байт
LW	загрузить (машинное) слово
LD	загрузить двойное (машинное) слово
LX	загрузить индексный регистр
=	присвоение
=N	присвоение с инверсией
=-	присвоить в дополнительном (двоичном) коде
=X	присвоение индексного регистра
B=	присвоение байта
W=	присвоение (машинного) слова
D=	присвоение двойного (машинного) слова

Табл. 5.3. Условные операторы и команды сравнения

==	команда «равно»
<	команда «меньше чем»
>	команда «больше чем»
<=	команда «меньше или равно»
>=	команда «больше или равно»
<>	команда «не равно»
IFT	выполнить команду, если в логическом аккумуляторе 1
IFF	выполнить команду, если в логическом сумматоре 0
ELSE	выполнить команду, если IF не выполнен
ENDI	конец IF структуры (программы с ветвлением)

Поддерживается вычисление сложных выражений в одной команде, операции инкремента/декремента, развитый набор операций условных переходов и организации циклов, возможности организации подпрограмм.

Из приведенного описания следует, что имеющихся вычислительных возможностей и набора команд программируемого логического контроллера вполне достаточно для реализации предложенных выше алгоритмов адаптивного управления скоростью резания и скоростью подачи.

Выводы по разделу 5

1. Адаптивное управление на тяжелом токарном станке с ЧПУ реализовано путем использования программируемого логического контролера (PLC) с заданием необходимых законов управления (по силе, температуре резания и другим факторам). Это позволяет корректировать разработанную программу ЧПУ в процессе обработки при изменении внешних воздействий на технологическую систему.

2. Законы управления режимами обработки на тяжелом токарном станке, а именно управление скоростью резания для достижения оптимальной температуры и управление подачей для регулирования силы резания реализованы посредством ПЛК.

3. Разработаны блок-схемы адаптивного оптимального управления процессом обработки на тяжелом токарном станке. В качестве системы принятия решений использовалось специально разработанное программное обеспечение, реализованное на устройствах ЧПУ со встроенными PLC.

4. Использование систем адаптивного оптимального управления позволит сократить затраты, повысить точность, увеличить срок службы режущего инструмента.

5. Применение рассмотренных усовершенствований существенно повышает надежность технологической системы. Кроме того, реализация системы на базе контроллера электроавтоматики станка значительно снижает затраты на модернизацию существующих станков с ЧПУ.

6 РАЗРАБОТКА ГАММЫ ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

6.1 Особенности конструкций тяжелых токарных станков

Станки токарной группы являются наиболее многочисленной группой в парке металлорежущих станков и составляют более 50% от общего числа станков. К тяжелым токарным станкам относятся станки, имеющие собственную массу более 10 т. Станки собственной массой более 100 т, на которых обрабатываются изделия массой более 60 т, относятся к сверхтяжелым или уникальным станкам.

Все тяжелые токарные станки имеют горизонтально расположенную ось вращения обрабатываемого изделия – ось шпинделя. Тяжелые токарные станки имеют и другую общую конструктивную особенность – горизонтально расположенные направляющие суппорта. Тяжелые токарные станки являются центровыми, то есть, оснащены задними бабками для закрепления правого торца изделия. На станках можно выполнять консольную обработку изделия, закрепившего в планшайбе (патроне) передней бабки. Кроме того, в комплект поставки станков входят люнеты (открытые, закрытые), которые могут быть использованы для поддержки длинных деталей, в люнеты могут быть установлены один или два торца изделия, которое получает приводное вращение от передней бабки.

Характерная черта новых станков – широкие технологические возможности, позволяющие производить обработку различных деталей широкой номенклатуры, имеющих сложную пространственную форму (криволинейные поверхности, конические поверхности, резьбовые участки и т.д.).

С этой целью в конструкции тяжелых станков предусмотрены:

– широкий диапазон регулирования скоростей главного движения и подачи;

–бесступенчатое регулирование величины подачи и скорости резания внутри механической ступени;

–быстродействующие и удобные для обслуживания механизмы управления.

В тяжелых станках большинство приемов, связанных с управлением станком, механизированы и автоматизированы. Практически все остальные приемы управления (переключение механических ступеней, перемещения задней бабки или пиноли бабки, толчковые вращения шпинделя, задание частоты вращения, подачи и т.д.), кроме зажима изделия и режущего инструмента, установки люнета под деталь, выполняются от системы ЧПУ, благодаря применению приводов постоянного тока с большим диапазоном регулирования, электромагнитных муфт, гидравлических устройств или отдельных электромеханических приводов.

Учитывая большие размеры изделий, обрабатываемых на тяжелых токарных станках (длина изделия до 40 м, диаметр до 6300 мм), в станках предусмотрены быстрые установочные перемещения суппорта, задней бабки.

Станки предназначены для выполнения самых разнообразных операций на деталях широкой номенклатуры из различных материалов резцами с режущими пластинами из твердого сплава, сверхтвердых материалов. Поэтому в конструкции станков учтены возможности получения высоких скоростей резания при чистовых работах, больших усилий резания при черновой обработке.

Конструкция обеспечивает удобство расположения и надежность органов управления зажимных устройств, обеспечивая минимальные затраты времени на выполнение отладки при переходе от одной операции к другой. Учитывая то, что на тяжелых токарных станках в смену при выполнении черновых операций снимается до 8 т стружки, станки, как правило, комплектуются транспортерами для сбора стружки.

Специфика изделий, обрабатываемых на тяжелых токарных станках – значительные массы и габариты обрабатываемых деталей, их уникальность,

высокая стоимость и большая трудоемкость механической обработки предъявляют особые требования к конструкции станков и их эксплуатации, существенно отличаются от традиционных решений малых и средних токарных станков.

На базе универсальных токарных станков с унификацией узлов и конструктивных решений при учете специфики обрабатываемых изделий выпускается большое количество различных специализированных и специальных станков, назначение которых – высокопроизводительная обработка специфических изделий. Эти станки в основном изготавливают на базе универсальных станков и имеют те же особенности эксплуатации, и универсальные станки.

Гамма тяжелых универсальных и специальных станков токарной группы создается для обработки изделий массой 20 ... 400 т, диаметром обработки над суппортом 800 ... 6300 мм, с расстоянием между центрами 4 ... 40 м.

Станки ПАО КЗТС отличаются повышенной жесткостью, универсальностью, высокой производительностью и точностью. Их уровень не уступает, а по точностным характеристикам превосходит лучшие мировые образцы (таблица 6.1), поэтому станки ПАО КЗТС получили признание отечественных и зарубежных заказчиков (таблица 6.2).

Станки предназначены для производительной обработки по программе изделий из стали, чугуна и других материалов. Возможна обработка самых сложных поверхностей (прямоугольных, криволинейных), нарезание любых видов резьб, в том числе конических, переключение механических ступеней передней бабки, изменение величины подачи и скорости резания, торцевая обработка с постоянной скоростью резания. Изменение позиции инструмента в станках новой гаммы автоматизировано и выполняется по управляющей программе.

Табл. 6.1. Технические данные станков по сравнению с лучшими зарубежными аналогами

	Наименование параметров	КЖ16274Ф3	КЖ16275Ф3	P500/600CNC	SR3	CTU3500
1	Производитель	КЗТС Украина	КЗТС Украина	HERKULES Германия	SKODA Чехия	TORNI TACCHI Италия
2	Наибольший диаметр обработки, мм: над суппортом над станиной	1000 1250	1400 2000	1200	1000 1340	2100 3500
3	Наибольшая длина обработки, мм	6000	8000	6500	6000	6000
4	Наибольшая масса обрабатываемой детали, кг	25000	60000	25000	25000	12000
5	Количество плоских резцедержателей, шт.	2	2	2	2	-
6	Размер плоских резцедержателей, мм	35,70	35,70	80-80		-
7	Дискретность задания перемещений, мкм	1	1	1	1	-
8	Количество управляемых осей координат, шт.	2	2	2	2	-
9	Границы частот вращения шпинделя, об/мин	2-450	1-160	1-300	1-700	1,5-250
10	Наибольший крутящий момент на шпинделе, кН·м	50	100	50	35	28
11	Мощность главного привода, кВт	60	110	85	100	40

Окончание табл. 6.1

12	Габаритные размеры станка, мм: длина × ширина × высота	14872×4880× ×2550	19157×6020× ×3020	12000×5200× ×2200		
13	Масса станка, кг	54000	106800	58000		
14	Тип системы ЧПК	Sinumeric 840D	Sinumeric 840D	Sinumeric 840D	Sinumeric 840D	Sinumeric 840D
15	Точность (при диаметре обработки 1800мм): Биение, мм Цилиндричность, мм Отклонение профиля, мм Качество поверхности	0,01 0,025/300 +/- 0,02 Ra0,8	0,01 0,025/300 +/- 0,02 Ra0,8	0,02 0,03/300 +/- 0,03 Ra0,8	0,02 0,03/300 +/- 0,03 Ra0,8	

Кроме токарной обработки на станках можно выполнять расточки центральных отверстий на глубину до 1000 мм, для чего станки комплектуются специальным приспособлением.

По заказу станки могут быть поставлены с накладным фрезерно-сверлильным приспособлением, с помощью которого можно выполнить шпоночные пазы, отверстия на внешней поверхности изделия, а также с шлифовальным приспособлением.

Станки новой гаммы обеспечивают производительную обработку с использованием самого прогрессивного инструмента, большинство приемов управления станком механизированы или автоматизированы.

В конструкции станков использованы:

- закаленные шлифованные направляющие;
- шпиндельные узлы с повышенной частотой вращения шпинделя;
- короткие кинематические цепи редукторов привода подачи;
- твердые корпусные детали;
- суппорты станков с плоским резцедержателем, имеющим высокую жесткость;
- специальные решения для направляющих суппорта; обеспечивают на станках высокую точность и жесткость обработки;
- телескопическая защита направляющих суппорта;
- принудительная контролируемая смазка направляющих и механизмов;
- диагностика срабатывания электро- и гидроаппаратуры станка;
- механизация уборки стружки с помощью транспорта;
- механизация перемещения закрытых люнетов на станине;
- механизация силового дожима обрабатываемого изделия центром задней бабки с контролем осевого усилия;
- механические (на уникальных станках – гидравлические) усилители в зажимных кулачках и другие конструктивные решения станков; обеспечивают простоту обслуживания станков, их высокую надежность и долговечность.

Высокопроизводительный тяжелый токарный станок с ЧПУ мод.1K675Ф3 (рис. 6.1; 6.3) предназначен для чистовой и черновой токарной обработки по программе изделий из стали, чугуна и других материалов. Производится обработка самых сложных поверхностей (цилиндрических, конических, криволинейных), нарезание любых видов резьбы, растачивание отверстий на глубину до 1000 мм, торцевая обработка с постоянной скоростью резания. Конструкция - с отработанной эргономикой. Станок оснащен современным суппортом с двумя ламельными боковыми резцедержателями.

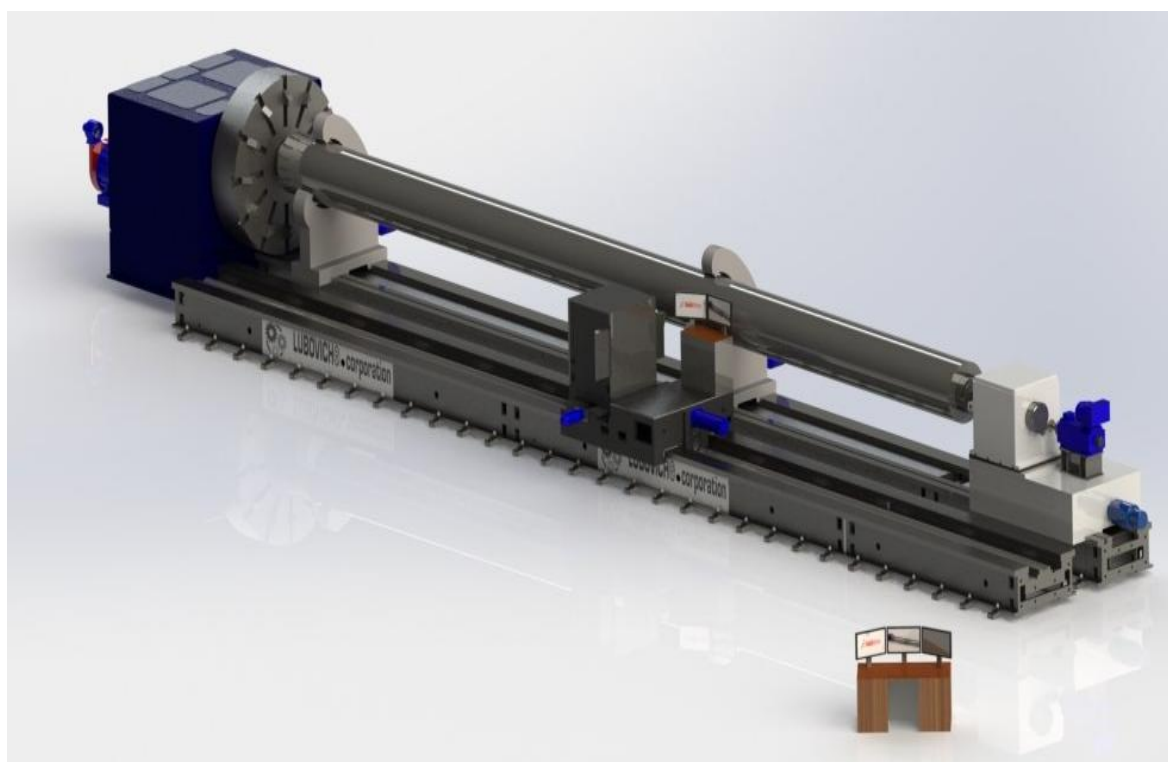


Рис. 6.1. Модель тяжелого токарного станка

Станок оснащен системой ЧПУ SINUMERIK 840D powerline фирмы Siemens с использованием цифровых модулей входов/выходов серии SIMATIC S7-300. Главный привод станка – SIMOREG тип 6RA7081, управляет двигателем главного движения мощностью 132 кВт. Используется линейка цифровых приводов подачи SIMODRIVE 611D в комбинации с высокомоментными двигателями серии 1FT6 с моментом вращения 115 Н·м.

Табл. 6.2. Технические характеристики тяжелого токарного станка
мод. 1K675ФЗ

Наименование характеристики	Значение
Габариты станка, мм	
длина	23 110
ширина	3 160
высота	6 020
Межцентровое расстояние, мм	12 500
Наибольший диаметр обрабатываемой поверхности над станиной, мм	2 550
Наибольший диаметр обрабатываемой поверхности над суппортом, мм	1 850
Скорость вращения шпинделя, мин ⁻¹	1 - 160
Тип системы ЧПУ (по согласованию с заказчиком)	Sinumerik 840D
Количество одновременно управляемых координат	3
Макс. вес обрабатываемой заготовки (с установкой в центрах), кг	100 000

Все ранее перечисленное оборудование производства фирмы Siemens. На станке используются оптические измерительные линейки LB382C фирмы Heidenhain. Благодаря примененному оборудованию станок отвечает самым серьезным требованиям по динамике, точности позиционирования и вращения, диапазону скоростей. Привод перемещения задней бабки MICROMASTER 440 фирмы Siemens. Шкафы управления станка производства Rittal, релейно-контакторная аппаратура в шкафах управления производства Siemens. Пульт управления станка фирмы Rittal с панелью оператора OP 012 и промышленным PC – PCU 50 фирмы Siemens. На станке используются гидростанции и гидравлическая аппаратура фирмы Rexroth. На рис. 6.2 смоделирован процесс обработки детали.

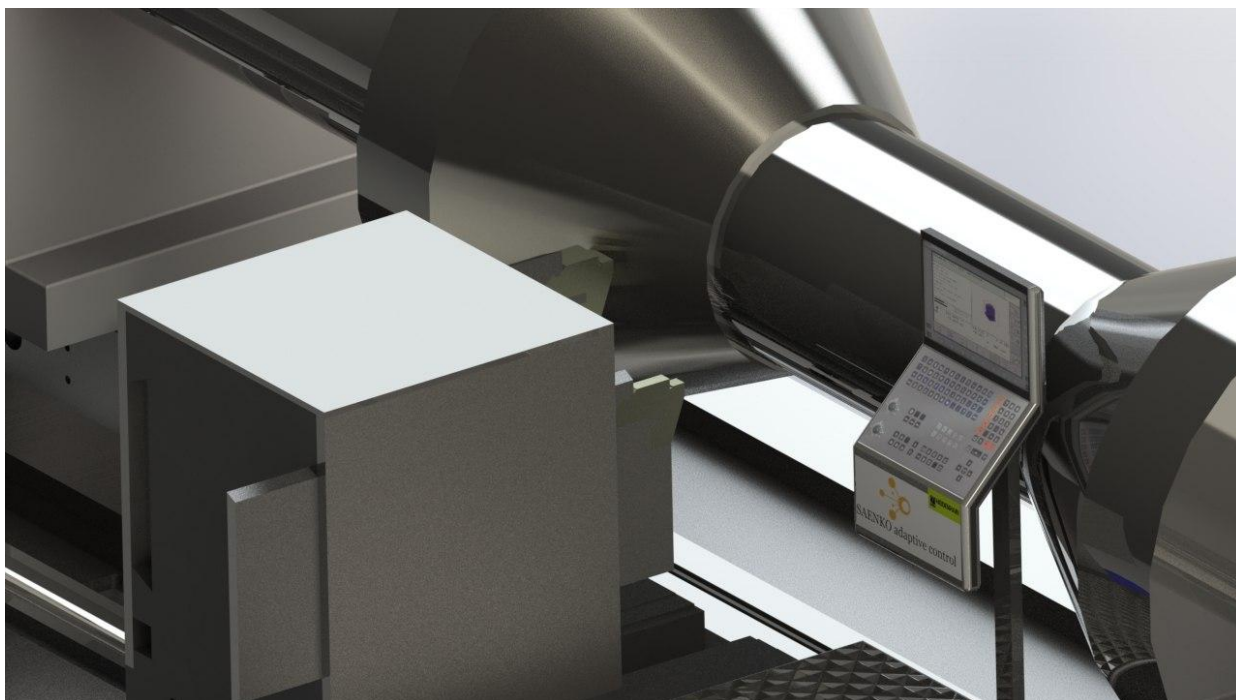


Рис.6.2. Изображение процесса резания детали

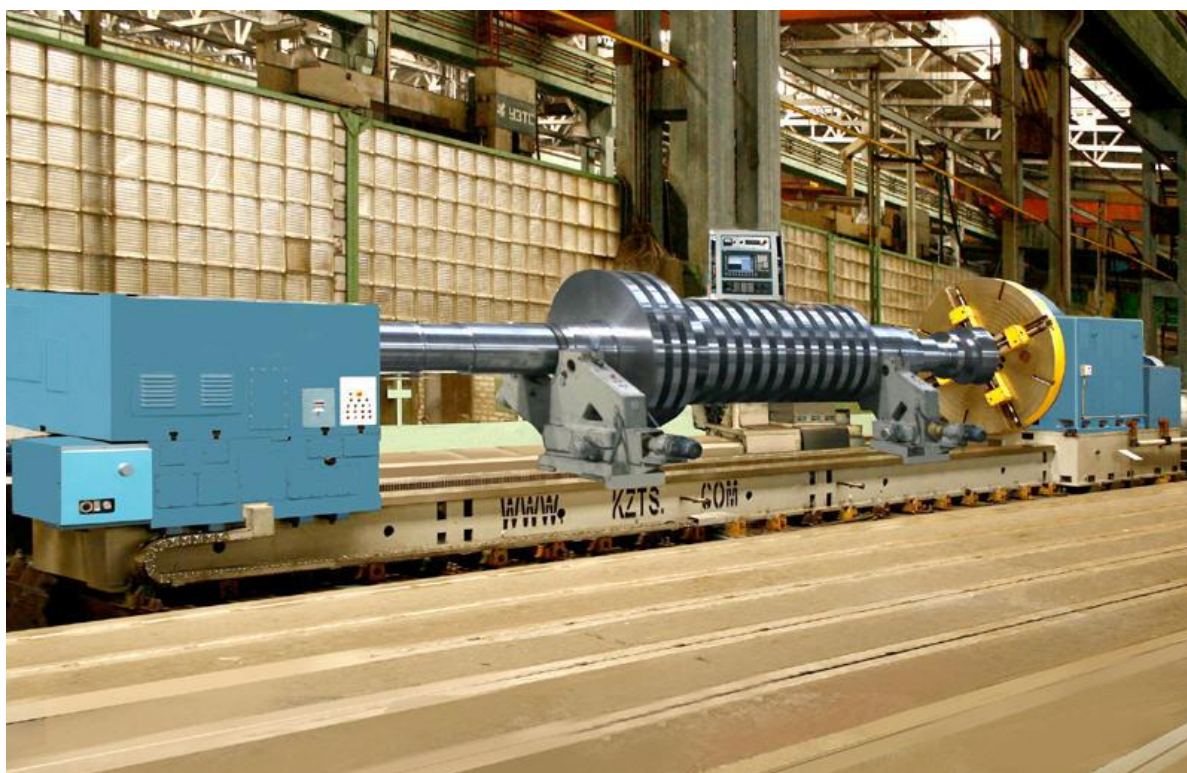


Рис. 6.3. Тяжелый токарный станок мод. 1К675Ф3

6.2 Разработка суппортов с адаптивными гидростатическими опорами

Схема суппорта тяжелого токарного станка представлена на рис. 6.4.

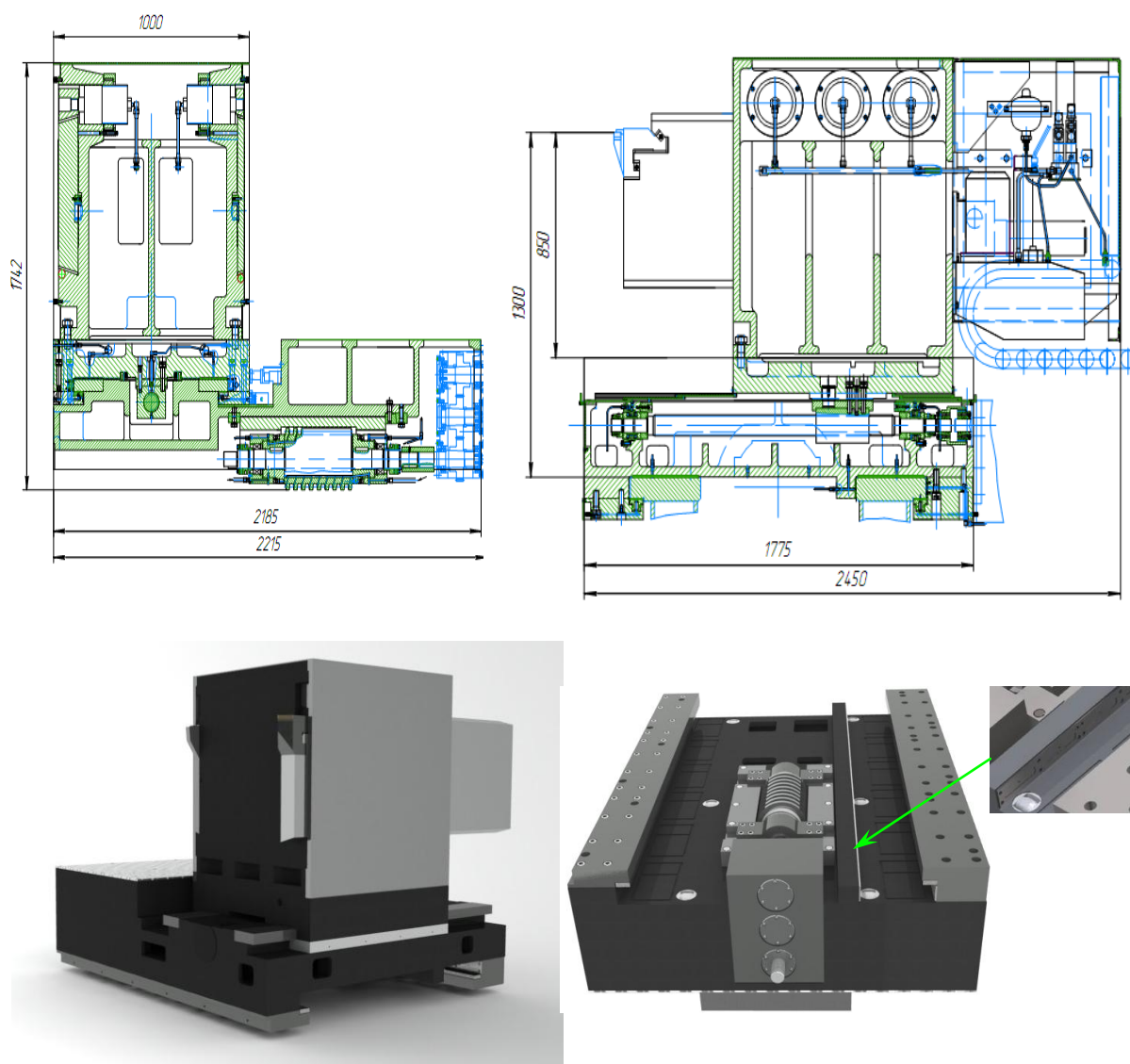


Рис. 6.4. Схема суппорта тяжелого токарного станка

Для обеспечения работоспособности систем адаптивного управления работой тяжелого станка в конструкции применены гидростатические опоры. При работе гидростатических направляющих узлов тяжелых токарных станков имеют место особенности, связанные с большими рабочими нагрузками, требованиями обеспечения высокой точности, которые необходимо учитывать при их проектировании.

Узел суппорта находится на литых чугунных направляющих. На суппорте выполнены гидростатические карманы (рис. 6.5), в которые подается масло через специальные каналы.

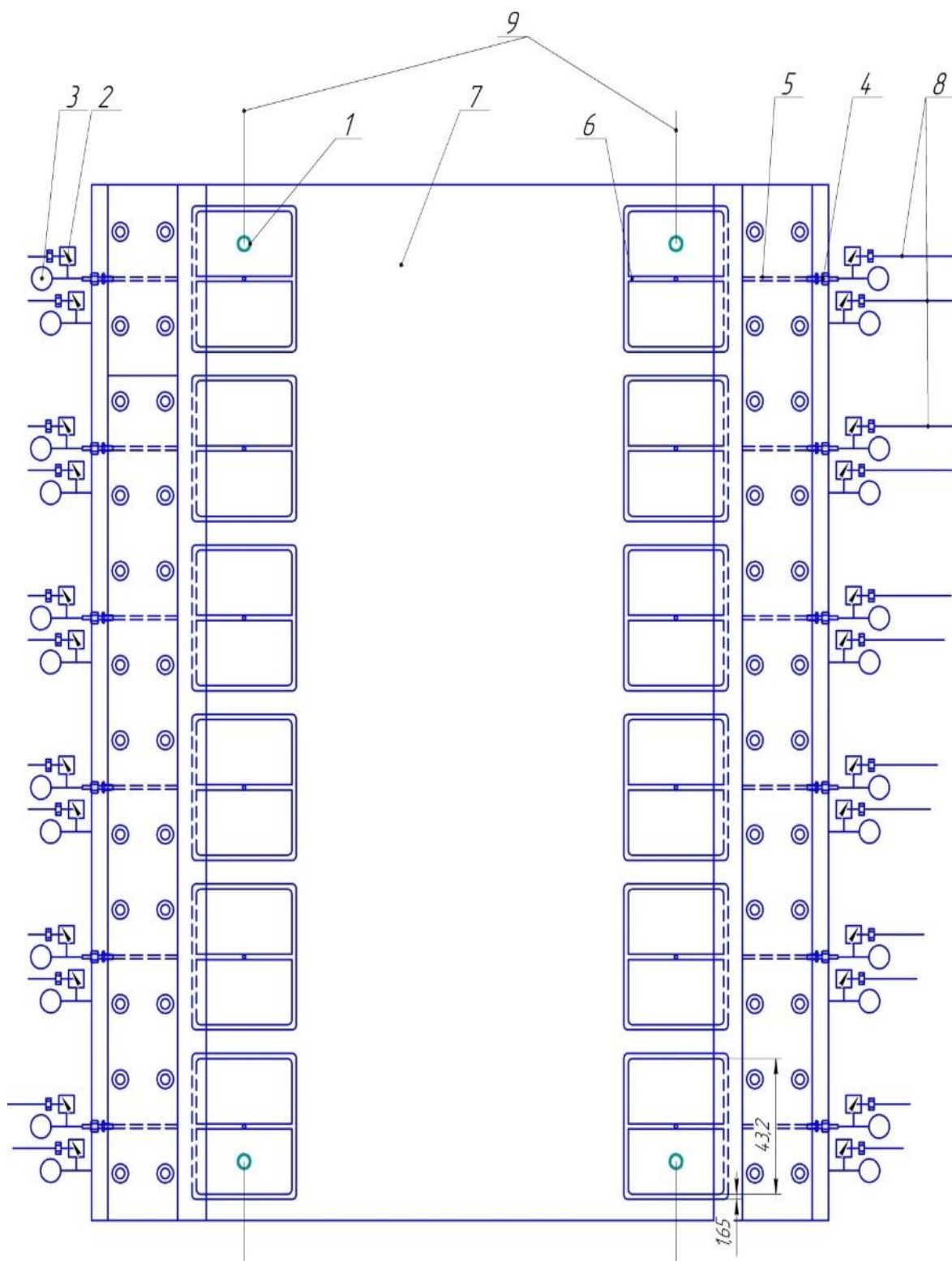


Рис. 6.5. Схема гидростатических направляющих суппорта тяжелого токарного станка

При работе станка гидростатические опоры удерживают суппорт с помощью давления масла, а его осевое перемещение фиксируется с помощью гидростатического червяка.

На суппорте применяется системы питания гидростатических опор типа «насос-карман». Система питания насос карман отличается высокой жесткостью, надежностью, простотой наладки и эксплуатации и обладает хорошими энергетическими показателями. В качестве основного источника давления используют многопоточные насосы, которые равномерно подают смазку во все нагруженные опоры.

Для повышения КПД системы перед многопоточным насосом устанавливают напорный насос, который обеспечивает смазочным материалом, благодаря этому разность давлений на входе и выходе не более 0,2...0,7 МПа. Излишек масла возвращается в сливной бак через управляемый клапан. Давление масла, создаваемое многопоточным насосом, поступает отдельно в каждый карман. Перед каждым выходом многопоточного насоса установлен золотниковый регулятор давления, который управляется адаптивной системой, которая обрабатывает данные с датчиков и с большой точностью отслеживает перемещение и регулирует давление в опоре. Для очистки смазочного материала предусмотрена система фильтрации.

Узел суппорта тяжелого токарного станка с гидростатическими опорами представляет собой сложную и взаимосвязанную схему гидроаппаратуры и электронной части, которая ею управляет. Многопоточный насос, регулирующие клапана и напорный насос связаны между собой не только гидроприводом, но и электроникой.

Принцип действия заключается в том, что датчики, которые находятся друг напротив друга, D_1 и D_2 и др., связаны попарно и передают сигнал на преобразователь сигнала датчика (рис. 6.6), затем ПСД находит разницу зазора δ (рис. 6.7) между каждым датчиком и шпинделем и передает уже готовый результат на микроконтроллер, который, в свою очередь, производит обработку результата и дает команду на регулирующие клапана.

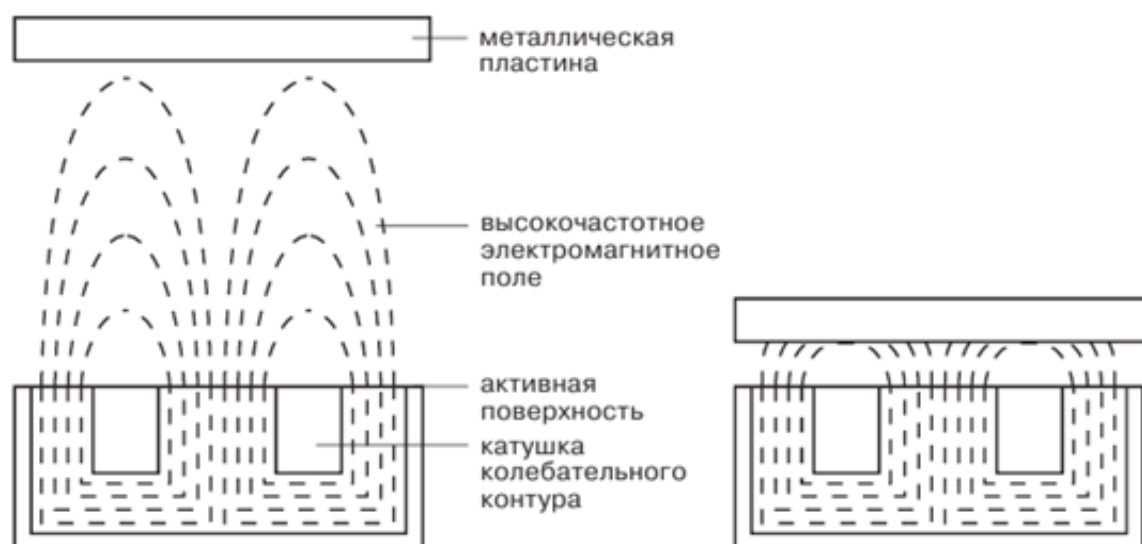


Рис. 6.6. Схема измерения магнитного поля в зазоре гидростатической опоры

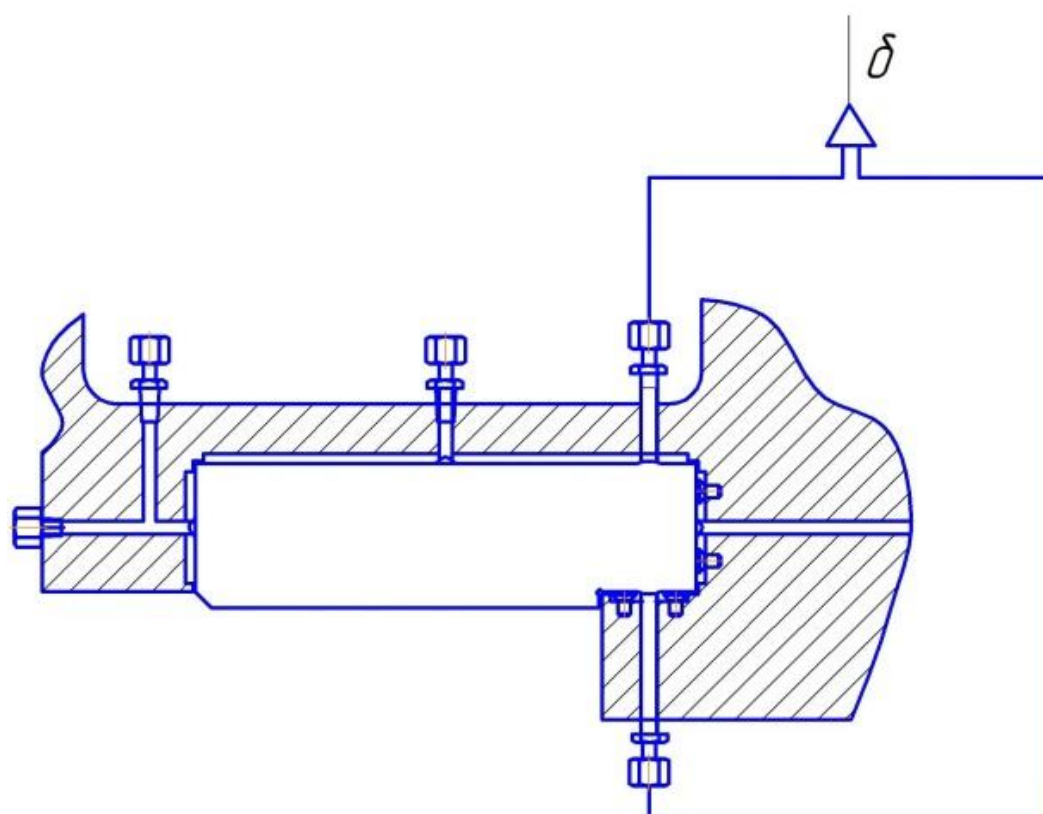


Рис. 6.7. Схема расположения индуктивных датчиков

Сигнал с микроконтроллера проходит через ШИП, который, в свою очередь, имеет собственную тактовую частоту, преобразует частоту и передает сигнал дальше через усилитель на регулятор. Регулятор, который получает команду, плавно открывает или закрывает подачу смазки. Излишнее давление поступает в общий канал сброса и сливается в бак.

Тип передачи сигнала в узле – аналоговый. Такой тип передачи позволяет производить плавный и своевременный сигнал от датчика к микроконтроллеру, от микроконтроллера к рабочему органу.

После того, как узел заработал, он дает команду для системы ЧПУ, что можно производить обработку. Узел суппорта начинает свою работу сразу же после включения питания в станке.

Для осуществления точного измерения положения суппорта во время обработки необходим датчик измерения зазора в кармане. Наиболее подходящими является индуктивный датчик.

Индуктивный датчик — бесконтактный датчик, предназначенный для контроля положения объектов из металла (к другим материалам не чувствителен).

Индуктивные датчики широко используются для решения задач АСУ ТП. Выполняются с нормально разомкнутым или нормально замкнутым контактом.

Принцип действия основан на изменении параметров магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности внутри датчика.

В гидростатических направляющих одной пластиной будет служить сами направляющие а сам датчик будет устанавливаться в специальные сквозные отверстия по средствам ввинчивания благодаря чему и будет удобная настройка положения датчика. В качестве диэлектрика выступит масло.

Достоинством чувствительного индуктивного элемента является простота конструкции, высокая точность и временная стабильность, возможность измерять незначительные величины.

В качестве датчика был выбран ДБ2.30М.90.15.9Т.1.В

Индуктивный датчик с аналоговым выходом, PNP, линейная зона рабочего зазора 1,6:14,0 мм; выходной ток в линейном зазоре 2,0...18,6 мА, питание 12...30 В, не встраиваемый заподлицо, винтовой зажим, IP67, - 25 С + 70 С, защита от КЗ в нагрузке, индикация.

6.3 Разработка конструкций шпиндельных узлов

Гидростатические шпиндельные опоры применяются в тяжелых токарных станках, в которых требуемая жесткость и точность вращения не обеспечивается подшипниками качения.

Шпиндельный узел находится в литом чугунном корпусе. Шпиндель монтируется в гидростатические втулки в которых имеются карманы, в которые подается масло через специальные каналы. Шпиндель выполнен в виде вала, на переднем торце которого монтируется планшайба (рис.6.8). При работе станка радиальные гидростатические опоры (рис. 6.9) удерживают вал с помощью давления масла, а его осевое перемещение фиксируется с помощью упорных гидростатических подшипников. Крутящий момент передается с двигателя через редуктор на планшайбу. На рис. 6.10 показана схема гидростатических адаптивных опор.

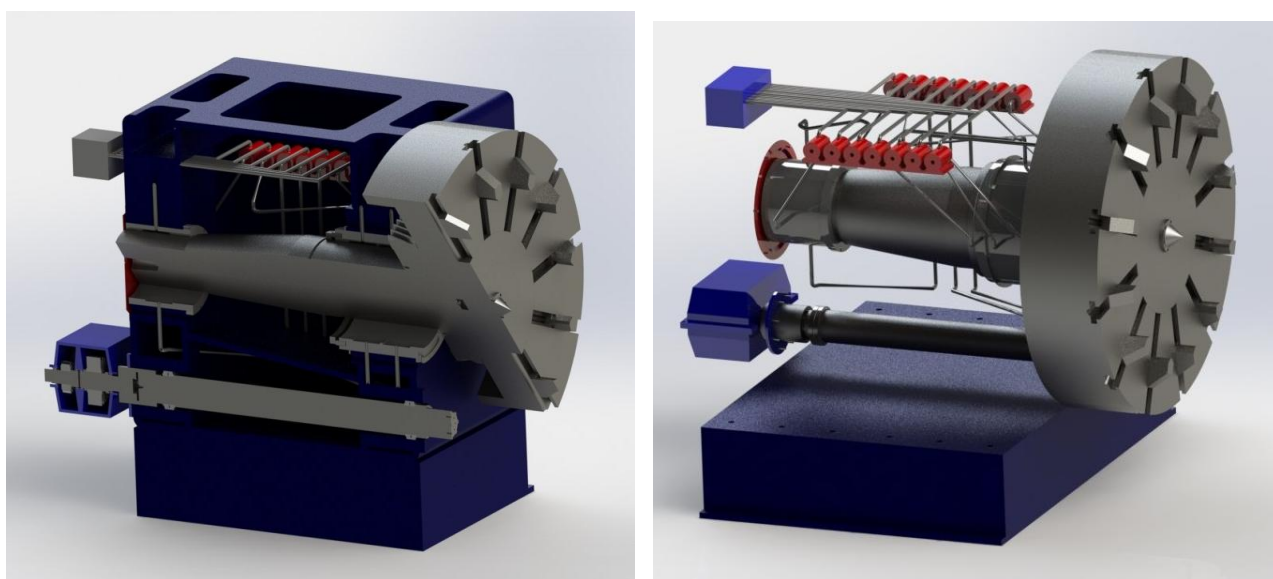


Рис. 6.8. Внешний вид шпиндельного узла

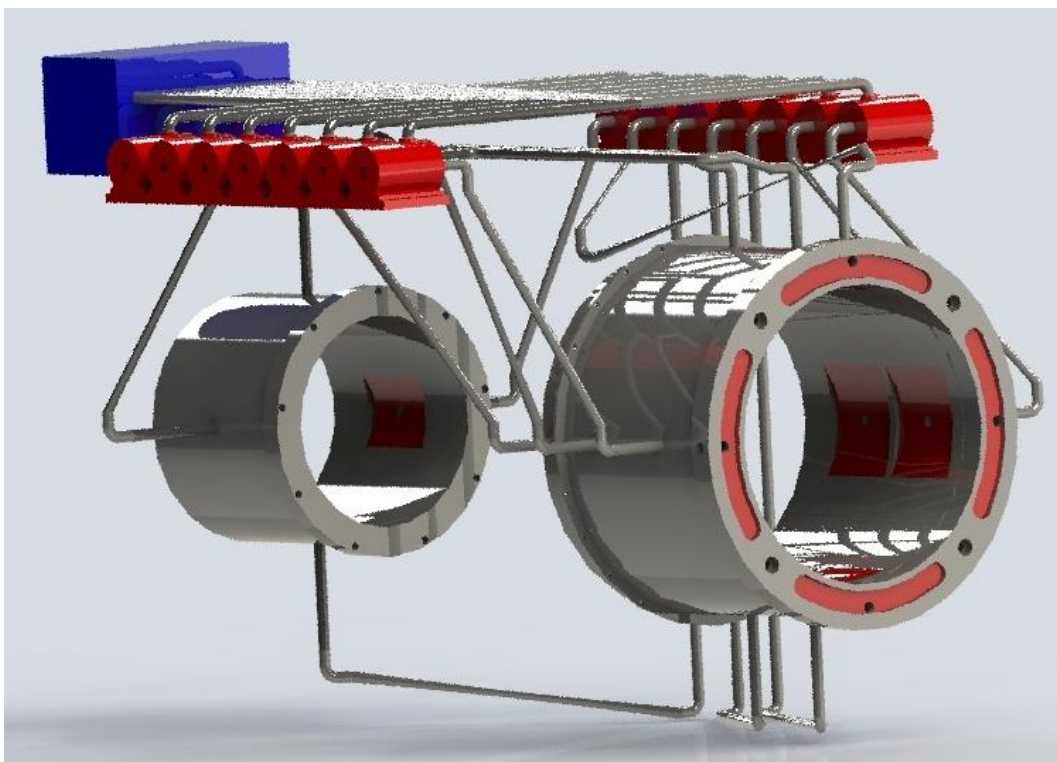
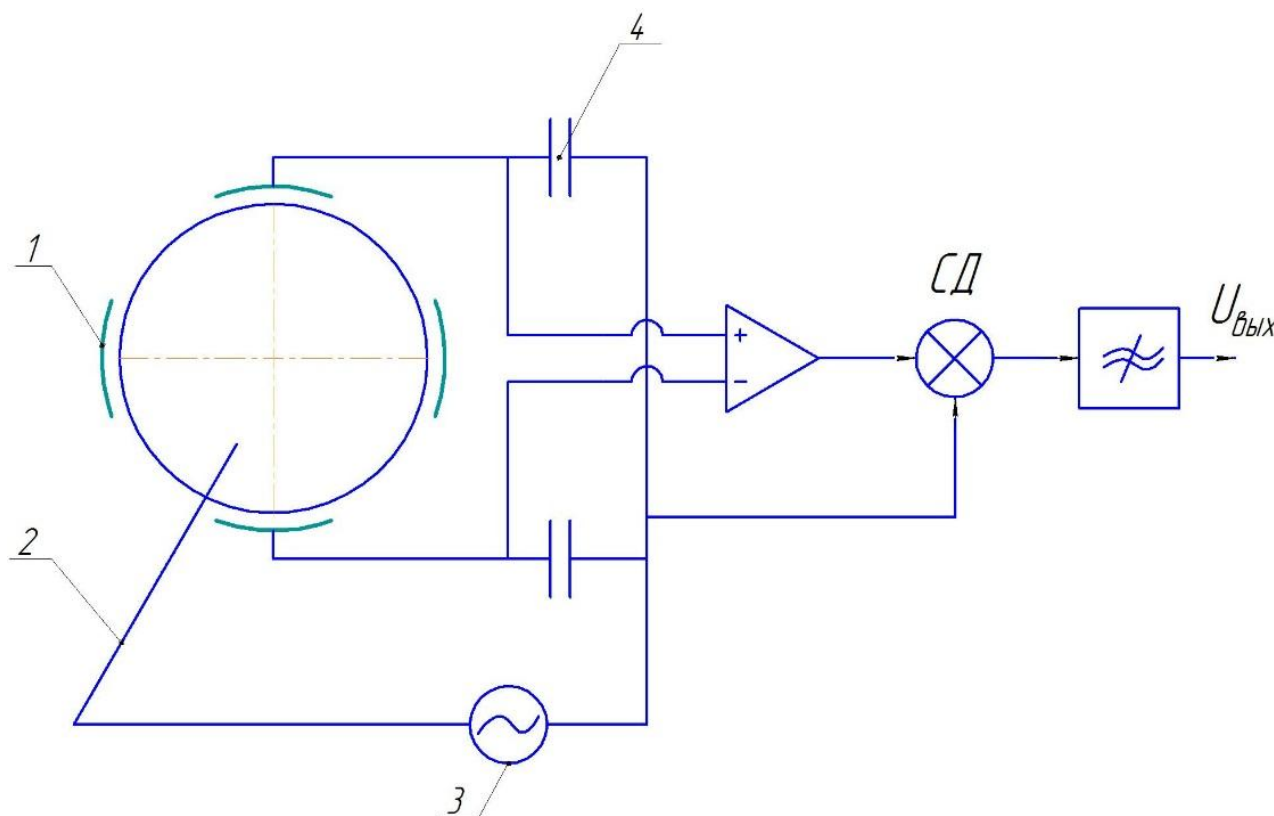


Рис. 6.9. Внешний вид гидростатических опор тяжелого токарного станка

Для осуществления точного измерения положения шпинделя во время обработки необходим датчик измерения зазора в кармане. К системе контроля зазором в гидростатических опорах относятся емкостные датчики, которые посредством проводов подключаются к плате управления (рис. 6.11).

Емкостный датчик расстояния представляет собой конденсатор, составленный из двух пластин, разделенных диэлектриком. Емкостные преобразователи используют метод изменения емкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. В гидростатическом подшипнике одной пластиной служит шпиндель, а другой – медная пластина, которая находится на дне кармана втулки. В качестве диэлектрика выступает масло.

Достоинством чувствительного емкостного элемента является простота конструкции, высокая точность и временная стабильность, а также возможность измерять незначительные величины.



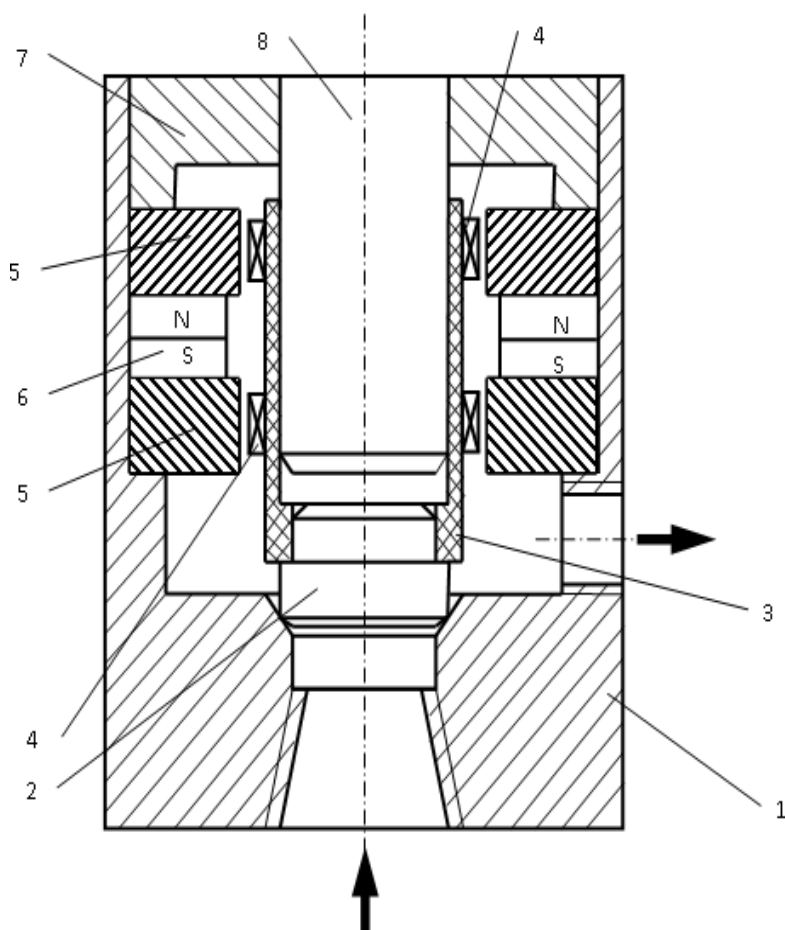
1-пластина с диэлектриком; 2 – щетка подвода тока к шпинделю;
3 – выпрямитель; 4 – конденсатор

Рис. 6.11. Схема подключения емкостного преобразователя

Для практической реализации рассмотренного технического решения на существующем оборудовании наиболее подходящим является предохранительный клапан. Принцип работы заключается в установке на каждый карман быстродействующего датчика зазора, и установке на питающую магистраль кармана управляемого по давлению предохранительного клапана. Один из вариантов конструкции такого клапана показан на рис. 6.12.

Этот клапан отличается от обычного предохранительного клапана тем, что вместо нажимной пружины в нем установлено нажимное устройство магнитоэлектрической системы.

Такое устройство справедливо будет назвать не клапаном, а регулятором, поскольку в пределах диапазона регулирования системы оно должно работать в режиме дросселирования.



- 1 – корпус из немагнитного сплава; 2 – керн; 3 – диэлектрический каркас;
 4 – катушка; 5 – магнитопровод; 6 – постоянный магнит; 7 – крышка;
 8 – направляющий стержень.

Рис.6.12. Конструкция управляемого предохранительного клапана

Этот факт обуславливает высокое быстродействие такого регулятора, которое ограничивается только временем перемещения керна 2 с каркасом 3 и катушками 4 на величину изменения дросселирующего зазора между керном и седлом корпуса, а также электромагнитной постоянной времени электрической цепи.

Алгоритм работы микроконтроллера заключается в том, что он получает сигнал с преобразователя датчика. Сигнал несет в себе число со знаком, это число определяет величину разности показаний одной пары датчиков. Затем эта разность обрабатывается исходя из неравенств:

$$\begin{aligned}\Delta p &= k_n \delta + k_u \int \delta dt; \\ \Delta p &= k_n \delta + k_u \int \delta dt + k \partial \frac{d\delta}{dt};\end{aligned}\tag{6.1}$$

Этот алгоритм вычислений производится для каждой пары датчиков. После того, когда будет произведен расчет всех пар, идет соответствующая команда. Производится решение, в зависимости от полученных результатов и подается сигнал на регулятор давления. Регулятор давления, в зависимости от сигнала, начинает открываться или закрываться, тем самым изменяя давление в карманах.

Анализируя результаты, полученные в процессе эксплуатации новых металлорежущих станков, в узлах которых применены гидростатические опоры жидкостного трения, можно сделать следующие выводы:

- точность траектории перемещений превышает точность поверхностей, находящихся в сопряжении;
- практически отсутствует износ поверхности скольжения;
- облегчены установочные движения на заданный размер;
- во всем диапазоне скоростей, включая скорости, близкие к нулю, обеспечивается плавность перемещений;
- степень сложности обслуживания не возросла;
- эксплуатационные затраты потребителя остались на том же уровне, как и для станков, в которых не применены гидростатические опоры.

Для тяжелых станков опоры жидкостного трения на сегодняшний день являются, в ряде случаев, единственным конструктивным вариантом, обеспечивающим необходимые эксплуатационные характеристики узлов – высокую несущую способность, долговечность, жесткость, точность и т.д.

Применение адаптивных систем питания обеспечивает следующие преимущества:

1. Повышается надежность опор, так как дросселирующие элементы при работе находятся в движении, что препятствует зарастанию дросселирующей щели.
2. Снижается нагрев опоры вследствие увеличения потока смазочного материала через опору по мере нагрева.
3. Повышается жесткость и несущая способность слоя смазочного материала.
4. Исключаются наладочные работы по установлению рабочего давления в карманах опоры.

6.4 Основные технические данные и характеристики станков КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3

Токарные станки моделей КЖ16274Ф3 (рис.6.13), КЖ16275Ф3 (рис.6.14) предназначены для обработки деталей типа тел вращения. Станки оснащены контурной системой ЧПУ, что позволяет производить обработку криволинейных контуров, нарезания резьб, спиралей с высокой точностью в автоматическом режиме по программе.

Станина станков сварена из 4-х балок. Направляющие станины закалены. По двум задним направляющим полкам осуществляется перемещение суппорта. Эти полки закрыты телескопической защитой. Открытый люнет устанавливается на трех направляющих. При этом в зоне установки люнета телескопическая защита убирается.

Суппорт спроектирован с учетом обеспечения необходимой точности обработки деталей со сложным криволинейным контуром. Привод продольной (ось Z) и поперечной (ось X) подач осуществляется от высокомоментных двигателей постоянного тока через редукторы с высокоточных зубчатых передач с ограниченным боковым зазором.

Конечным звеном приводов подач по оси X является передача винт-гайка качения. Редуктор оси Z оснащен гидролюфтовыбирающим устройством для выборки люфта в реечном зацеплении.



Рис. 6.13. Токарный станок с ЧПУ модели КЖ16274ФЗ



Рис. 6.14. Токарный станок с ЧПУ модели КЖ16275ФЗ

Резцовые блоки специальной конструкции закрепляются в плоских резцедержателях.

Передняя бабка для обеспечения высокой жесткости выполнена с неразъемными шпиндельными опорами. Две ступени бабки обеспечиваются кинематической цепью, собранной из точных зубчатых передач и подшипников качения. В качестве привода применен двигатель постоянного тока, регулируемый при 350...1500об/мин с постоянной мощностью, а при 315...350 об/мин – с постоянным моментом.

Станки оснащены контурной системой ЧПУ CNC типа «Sinumeric 840D». Механизмы основных нагруженных узлов снабжены автоматической системой смазки.

Модификации станков КЖ16274.300Ф3 с межцентровым расстоянием 10000 мм и КЖ16275.600Ф3 с межцентровым расстоянием 18000 мм оснащены двумя токарными суппортами и восемью специальными люнетами.

На рисунках 6.15 – 6.16 показаны токарные станки с ЧПУ нового поколения в цехах ПАО КЗТС и ПАО НКМЗ соответственно.



Рис. 6.15. Токарные станки с ЧПУ модели КЖ16275Ф3 на сборочном участке ПАО КЗТС



Рис.6.16. Токарные станки с ЧПУ нового поколения в цехах ПАО НКМЗ

Технические характеристики станков моделей КЖ16274Ф3 и КЖ16275Ф3 представлены в таблице 6.3.

Табл. 6.3. Технические характеристики токарных станков с ЧПУ

Наименование параметра	Значения	
	КЖ16274Ф3	КЖ16275Ф3
1. Предельные размеры обрабатываемой наружной поверхности, мм: - наибольший диаметр над суппортом - над станиной - наибольшая длина в центрах	1000 1300 6000	1400 2000 8000
2. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки в центрах, кг	25000	60000
3. Количество плоских резцедержателей, шт.	2	
4. Наибольшие перемещения рабочих органов суппорта, мм: - салазок (ось X) - каретки (ось Z) - плоских резцедержателей	600 5930 300	630 8400(8244+155) 425
5. Наибольшее перемещение задней бабки, мм	6260	5625
6. Наибольшее перемещение пиноли задней бабки, мм	200	225
7. Размер (ширина) плоских резцедержателей, мм - левого - правого	70 35	
8. Дискретность задания перемещений (осей X и Z), мкм	1	
9. Количество управляемых осей координат (осей X и Z)	2	
10. Количество одновременно управляемых осей координат (осей X и Z)	2	
11. Пределы частот вращения шпинделя, об/мин - I ступень - II ступень	2 - 86,5 10,5 – 450	1-32 5-160
12. Пределы рабочих подач суппорта по осям X и Z, мм/мин	0,5 – 2500	0,5-4000
13. Предел скоростей быстрых (установочных) перемещений суппорта по осям, мм/мин, не больше - ось X - ось Z	2500 5000	4000

Продолжение таблицы 6.3

Наименование параметра	Значения	
	КЖ16274Ф3	КЖ16275Ф3
14. Скорость перемещения задней бабки, мм /мин, не более	2260	2650 (2880)
15. Скорость ускоренного перемещения пиноли задней бабки, мм /мин, не более	460	380
16. Скорость установочного перемещения плоских резцедержателей, мм /мин, не более	700	640
17. Скорость перемещения пиноли задней бабки при силовом дожиме центром, мм /мин, не более	4,7	4
18. Скорость перемещения люнетов полузакрытых (для КЖ16275Ф3-закрытых), мм / мин, не более	2180	2900
19. Число механических степеней частот вращения шпинделя	2	
20. Число ступеней рабочих подач	Бесступенчатое регулирование	
21. Отношение подач суппорта продольной (ось Z) к поперечной (ось X)	1:1	
22. Высота центров, мм	700	1100
23. Предельные значения шага нарезаемых резьб, мм	0,1 ... 300	
24. Наибольший крутящий момент на шпинделе, кН·м	50	100
25. Мощность привода главного движения, кВт	60	110
26. Наибольшая сила резания P _z , кН - левого резцедержателя - правого резцедержателя	50-60 25-30	100 50
27. Суммарная мощность установленных на станке	148,23	193,76
28. Размер внутреннего конуса, диаметр, мм×конусность: - в шпинделе передней бабки - во вращающемся центре задней бабки	110 x 1:7 80 x 1:7	140x1:7
29. Угол конуса центров передней и задней бабок	75°	

Продолжение таблицы 6.3

Наименование параметра	Значения	
	КЖ16274Ф3	КЖ16275Ф3
30. Габаритные размеры станка (без отдельно расположенного электрооборудования), мм: -длина -ширина -высота	12963 4103 2515	19157 6020 3020
31. Масса станка (вместе с отдельно расположенными агрегатами гидро- и электрооборудования), кг	54000	106800
32. Оснащенность станка накладными устройствами и приспособлениями:		
32.1 Кулачки для зажима изделия в обхвате, в распор, с механическим усилителем зажима: - количество, штук: -зажимное усилие, кН	4	
	до 150	до 200
32.2 Люнет открытый роликовый: -диаметры шеек, устанавливаемых деталей, мм	200-800	700-1600
32.3 Люнет закрытый: -диаметры шеек деталей, устанавливаемых на опорах скольжения, мм; -диаметры шеек деталей, устанавливаемых на опоры качения, мм	140-420 45-285	250-650 265-565
32.4 Люнет полузакрытый (для КЖ16275Ф3- закрытый): -диаметры шеек деталей, устанавливаемых на опоры скольжения, мм; -диаметры шеек деталей, устанавливаемых на опоры качения, мм	400-630 265-495	630-900 540-810
33. Класс точности станка	П	
34. Уровень звука на рабочем месте оператора, дБ	80	
35. Корректированный уровень звуковой мощности, дБ	110	

Продолжение таблицы 6.3

Наименование параметра	Значения	
	КЖ16274Ф3	КЖ16275Ф3
36. Показатели точности станка		
Гарантированная точность обработки детали:		
- радиальное биение при обработке в центрах, мм	0,01	
- торцевое биение, мм	0,01	
- нецилиндричность на длине 1000 мм, мм	0,01	
- постоянство диаметра в поперечном сечении на образце Ø800 на длине 300 мм, мм	0,008	
- постоянство диаметров в продольном сечении, мм	0,01	
- плоскостность торцевой поверхности образца, обработанного на станке, мм	0,015	
-точность криволинейного профиля(R=100мм), мм	0,05	
-шероховатость Ra криволинейных и конусных поверхностей, обрабатываемых на станке, мкм	1,6-1,2	
37. Характеристика электрооборудования		
37.1.Род тока питающей сети	Переменный, трёхфазный	
37.2.Частота тока, Гц	50	
37.3.Напряжение питающей сети, В	380	
38. Характеристика электроприводов		
38.1 Привод главного движения:	110	
-мощность номинальная, кВт	440	
- напряжение питания номинальное, В	315	
-частота вращения номинальная, об/мин	1500	
-частота вращения максимальная, об/мин		
38.2 Приводы подач (оси ХиZ):	61	115
- момент номинальный, Н·м		
-частота вращения номинальная, об/мин	1500	1500
38.3 Устройство с ЧПУ:	Sinumeric840D	
- тип	1	
- дискретность задания перемещений, мкм		

Окончание таблицы 6.3

Наименование параметра	Значения	
	КЖ16274Ф3	КЖ16275Ф3
39. Характеристика систем смазывания и воздуха		
39.1 Гидростанция передней бабки:	400	
-емкость бака, л	18	8/8
-производительность насоса Q, л/мин	2,5	1,5/3
-рабочее давление P, МПа		
-мощность электродвигателя насоса N, кВт	2,2	3
-мощность электродвигателя вентилятора теплообменника N, кВт	0,75	
39.2 Гидростанция задней бабки:		
- производительность насоса Q, л/мин	5	
- рабочее давление P, МПа	9	10
- мощность электродвигателя насоса N, кВт	2,2	
39.3 Гидростанция суппорта		
-емкость бака для смазки, л	8/12	44
-производительность насоса для смазки Q, л/мин	1,5/1,5	5
-рабочее давление P, МПа	24	22
-мощность электродвигателя N, кВт	0,55/0,55	4
39.4 Воздух	Кл. 4ГОСТ17433-80P=0,5МПа Подводится от цеховой магистрали на рабочую площадку суппорта	

6.5 Устройство, принцип работы станков КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3 и их составных частей

Конструкция станков и их компоновка обеспечивают необходимую точность обработки и создают достаточные условия для безопасного и удобного обслуживания.

Обработка внешних поверхностей детали осуществляется методом обточки, при котором детали сообщается необходимая частота вращения (главное движение), а резцу – перемещение подачи.

В станках применены новейшие достижения в области станкостроения.

Станки имеют традиционную компоновку с базовыми узлами и элементами несущей системы, их конструктивные параметры определены на базе результатов проведенных в данной работе исследований, многолетнего опыта проектирования, натурных экспериментов, эксплуатации станков, современных методов математического моделирования, расчетов.

Особое внимание уделено узлам, которые определяют точность станков.

В шпиндельных опорах передней бабки и во вращающемся центре задней бабки станков применены высокоточные крупногабаритные подшипники фирмы FAG поточности и параметрам выше класса "SP" или гидростатические подшипники, позволяющие выполнять обработку деталей с более жесткими допусками.

Создана новая конструкция токарных суппортов, согласно которому на вертикальных направляющих установлены опоры качения, а горизонтальные направляющие армированы синтетическим антифрикционным покрытием. Для направляющих продольных и поперечных перемещений могут применяться гидростатические опоры, что позволяет значительно увеличить точность, плавность перемещений, практически ликвидировать износ, эффективно демпфировать вибрации. Высокоточные шпиндельные узлы, направляющие, поддержки планшайбы и люнеты с гидростатическими опорами обеспечивают необходимую точность, надежность, долговечность сверхтяжелых токарных станков и позволяют резко повысить их грузоподъемность.

Привод суппортов по оси Z имеет регулируемое люфтовывбирающее устройство, суппорт оснащен резцедержателем, который имеет высокую жесткость, по осям перемещения суппорта X и Z установлены измерительные линейки фирмы «HEIDENHAIN».

Гидросистема выполнена на базе элементов фирмы Rexroth, BOCH и обеспечивает повышение рабочего давления (до 22 МПа). Выносная гидростанция передней бабки и устройство охлаждения масла обеспечивают высокую термостабильность узла.

Основные узлы суппорта – каретка и поперечные салазки с ламелями. Для обеспечения плавности и точности перемещений горизонтальные направляющие армированные антифрикционным материалом – лентой из наполненного фторопласта, на вертикальных направляющих установлены роликовые опоры качения. Каретка и поперечные салазки с ламелями имеют жесткую конструкцию, обеспечивающую высокую точность обработки. На ламелях возможна установка инструментального модульного оснащения с режущими пластинами из твердого сплава с покрытиями и инструментом из сверхтвердых материалов.

В шпиндельной бабке предусмотрено устройство устранения дисбаланса шпинделя и планшайбы.

Задняя бабка оснащена датчиком активного контроля осевого усилия зажима изделия в центрах.

Диагностика технического состояния ответственных узлов станка обеспечивается оснащением узлов соответствующими датчиками, разработкой алгоритма работы системы управления станком и выдачей на пульт управления или дисплей компьютера сообщения об отказе или неисправности и метода устранения или указания для действий оператора станка.

Управление станка от системы числового программного управления фирмы «SIEMENS» обеспечивает повышение точности изготовления деталей и производительности. Система управления станком Sinumeric 840 D сочетает задачи числового программного управления, программируемого контроллера и задачи периферии в едином NCU-модуле. Варианты процессора NCU дают возможность оптимально приспособить систему управления, как к станку, так и к задачам механической обработки, и позволяет максимально свести к минимуму влияние человеческого фактора. Разработаны дополнительные адаптивные модули для осуществления адаптивного управления процессом обработки с компенсацией упругих и температурных деформаций элементов несущей системы станка, заготовки, для осуществления предельного и оптимального регулирования режимов работы станка.

Загрузка станка осуществляется цеховым краном.

Стружка с помощью транспортера доставляется в ящик, установленного за станиной в углублении фундамента.

Спроектированы и изготовлены станки КЖ16274.300Ф3 с межцентровым расстоянием 10000 мм и станок КЖ16275.600Ф3 с межцентровым расстоянием 18000 мм. Станки оснащены двумя токарными суппортами и восемью специальными люнетами.

Изготавливаются также станки модели 1Д655Ф3 повышенной жесткости, с двумя суппортами, модели КЖ16277Ф3 – повышенной жесткости, для обработки валков из труднообрабатываемых материалов высокой твердости.

6.6 Статическая жесткость и динамическая устойчивость станков

Жесткость и динамическая устойчивость станков является важнейшим критерием их эксплуатационных качеств – производительности, точности размеров и формы, а также качества поверхности обработанных деталей, в связи с чем этой теме посвящен широкий круг исследований.

Тяжелые станки, вследствие больших линейных размеров базовых деталей, имеют значительно меньшую жесткость по сравнению с машинами средних размеров, поэтому необходимо было принимать специальные меры для повышения устойчивости систем, исследовать такие специфические вопросы, как совместная работа станин тяжелых станков с фундаментами, влияние контактных деформаций в подвижных и неподвижных стыках, роль зажимных устройств и создания предварительных напряжений в подвижных стыках и т.д.

Работа по исследованию статической жесткости включала следующие основные этапы:

1. Измерение на натурных образцах станков фактической суммарной податливости - деформаций всех элементов, приведенных к вершине режущей кромки инструмента для тяжелых станков токарного типа.

2. Измерение деформаций элементов и анализ баланса жесткости станков указанных типов различной конструкции с оценкой удельного влияния на

суммарную величину деформаций отдельных механизмов, групп механизмов, базовых и корпусных деталей, а также способов их соединения друг с другом.

Было установлено, что основное влияние на точность и общий баланс жесткости станков токарной группы оказывают деформации системы суппорта и асимметричные деформации опор шпинделя вследствие неравномерной их жесткости.

Проведен анализ детального баланса упругих перемещений основных механизмов суппортов, салазок, шпиндельных узлов, позволил оценить влияние различных видов деформаций – контактных в подвижных и неподвижных стыках, собственных деформаций деталей – на общую жесткость узлов.

Исследование податливости корпусных и базовых деталей проводилось различными методами: твердотельное моделирование с помощью оригинальных программных средств, пакетов COSMOS Works, ANSYS.

Также осуществлялось натурное моделирование. На литых из силумина моделях в масштабе 1:5 вариантов корпусов передних бабок с разной толщиной и расположением стенок и ребер были найдены оптимальные варианты для токарных станков новой гаммы. В частности, испытания модели передней бабки станка 1K670ФЗ подтвердили, что при всех комбинациях нагрузок ось шпинделя остается параллельной оси центров ненагруженного станка при удовлетворительном напряженном состоянии элементов корпуса.

Напряженное состояние исследовалось методом тензометрирования.

Была разработана и освоена методика моделирования и исследования корпусных деталей из органического стекла. С учетом масштаба и коэффициентов сходства создавались модели люнетов и планшайб тяжелых токарных станков новой гаммы. В результате выявлено удельное влияние элементов конструкции на ее жесткость, показано также, как при правильном перераспределении металла в отливке, при том же весе увеличить ее жесткость до 28%.

При проектировании гаммы токарных станков для определения наилучшей формы поперечного сечения станин с целью обеспечения наибольшей жесткости и виброустойчивой станков гаммы методом фотоупругости исследовалось напряженное состояние вариантов форм станин по сравнению с отечественными и иностранными конструкциями.

Проведен комплекс работ по динамической устойчивости тяжелых станков.

Выполнены исследования сил резания и предельных подач при поперечном точении на токарных станках. Выявлено, что составляющая силы резания P_x может достигать и даже превышать составляющую P_z при обработке прокатных валков из отбеленных чугунов твердостью от 320 до 700НВ, величины сил P_x и P_z достигают 100...120 кН, а ширина стружки – до 200 мм.

Возникающие поперечные колебания обрабатываемого валка через соответствующие изменения P_z и $M_{кр}$ вызывают вращательные колебания механизмов привода главного движения с широким спектром частот.

По результатам исследований разработаны и внедрены фрикционный виброгаситель вращательных колебаний, усиленные конструкции люнетов, повышена жесткость суппортов с уменьшением количества стыков и предоставлением специальной формы и размеров направляющим верхней части суппорта.

Как показали эксплуатационные исследования, на токарных станках новой гаммы вибрации при резании практически не возникают.

Исследована виброустойчивость тяжелых токарных станков, определены границы виброустойчивости, внедрена инструкция сдаточных испытаний тяжелых токарных станков на виброустойчивость. В результате проведенных исследований по жесткости и внедрение их результатов все режимы обработки, практически реализуемые, находятся значительно (в 1,3...1,6 раза) ниже границы виброустойчивости.

6.7 Долговечность, надежность и длительное сохранение точности

В отличие от станков среднего размера, тяжелые станки из-за специфических условий их эксплуатации в небольших количествах на каждом заводе, должны быть приспособлены одновременно для осуществления черновых операций с большими нагрузками на рабочие механизмы и поверхности и сохранять точность для чистовых операций. Поэтому вопрос минимального износа основных узлов, определяющих точность станка, имеют первостепенное значение. Обширные исследования в этой области были посвящены вопросам износостойкости рабочих направляющих, выбора износостойких сочетаний материалов пар трения, осуществлению технологических мероприятий по повышению твердости направляющих, проектирование и исследование самых разных систем смазки, в частности гидростатических и гидродинамических, применению крупных подшипников качения для узлов, шпинделей.

Проведены стендовые и промышленные исследования узлов, шпинделей тяжелых станков на подшипниках качения с целью выбора оптимальной компоновки и типа подшипников. Длительные экспериментальные работы позволили отработать основные принципы получения узлов, шпинделей повышенной точности на подшипниках качения класса «А». В основу принципа был положен селективный отбор роликов и колец подшипников качения и разработана технология обработки связанных деталей и сборки шпиндельного узла.

Результаты, полученные при испытании и эксплуатации двух первых станков повышенной точности модели КЖ16274Ф3, показали высокую точность обработки деталей из некруглости в пределах 0,005-0,01мм. Станки модели КЖ16274Ф3, установленные на ПАО НКМЗ, в течение 10 лет эксплуатации сохраняют первоначальную точность по некруглости в пределах 0,005 мм.

Проведен широкий комплекс работ по повышению надежности и долговечности электроприводов, которые в тяжелых станках являются

сложными, многомашинными системами с большим количеством аппаратов в цепях управления.

Исследование различных вариантов регулируемого электропривода позволили отработать общие для многих типов тяжелых станков рекомендации по использованию определенных типов электрических машин постоянного тока, наиболее надежных бесконтактных элементов в цепях управления, по рациональному проектированию схем управления электроприводом, которые обеспечивают надежную и длительную работу станков в целом.

6.8 Оптимизация технических параметров станков

Станки имеют рациональную компоновку с базовыми узлами и элементами несущей системы, с конструктивными параметрами, которые определены на базе исследований, представленных в разделах 3, 4, многолетнего опыта проектирования, натурных экспериментов, эксплуатации станков, современных методов математического моделирования, расчетов.

Особое внимание уделялось узлам, которые определяют точность станков.

В связи с проектированием новой гаммы тяжелых токарных станков были поставлены следующие цели:

- определить оптимальные технические характеристики станков;
- установить оптимальный состав и размерный ряд гаммы, рациональный знаменатель ряда, рациональное количество моделей «нормального», «легкого» и «тяжелого» исполнения, определить рациональные новые компоновки и схемы обработки;
- определить оптимальную номенклатуру накладных приспособлений для расширения технологических возможностей станков;
- обеспечить единство конструктивных решений и архитектурное сходство.

Выполнено статистическое исследование, в котором использовались более 340 тяжелых станков на 22 ведущих предприятиях таких отраслей, как

тяжелое машиностроение, турбостроение, электромашиностроение, судостроение и др.

Исследованы следующие вопросы:

- разновидности обрабатываемых изделий по конфигурации, материалам, степени точности и классах чистоты обработки;
- применяемый режущий инструмент и режимы резания;
- использование станков по диаметру, длине, высоте и весу установленного изделия;
- используемые пределы скоростей главного движения и подачи, мощности главных приводов и допустимые усилия резания;
- используемое количество суппортов, использование накладных приспособлений для накатки, шлифовки, фрезерования, сверления, расточки, полировки, подачи СОТС, установки и выверки тяжелых изделий, измерительных устройств для крупногабаритных деталей и т. д.

По результатам этих исследований в новой гамме тяжелых токарных станков предусмотрены запасы мощности и грузоподъемности, уменьшены вращающие моменты и длины станков, изменено количество суппортов и люнетов, расширены диапазоны регулирования приводов подач и главного движения; станки стали универсальными, маневренными в управлении, имеют меньший вес при одновременном повышении их точности, производительности, надежности.

Гамма станков, отличающаяся широкой степенью унификации станков, проектировалась и изготавливалась конструктивно–размерными рядами архитектурно-подобных машин.

Унификация деталей между базовыми моделями станков достигает 70%, а с учетом значительного количества модификаций – до 90%. За счет унификации и сокращения количества наименований оригинальных деталей партионность выпуска выросла в среднем в 3,5 раза.

Предпосылкой для широкой унификации станков гаммы стало агрегатирование отдельных механизмов в самостоятельные узлы, которые

собираются и испытываются предварительно и поступают на общий монтаж в готовом виде.

Унификация и агрегатирование позволили типизировать технологические процессы, сократить номенклатуру технологического оснащения и циклы производства, снизить себестоимость изготовления станков на заводах производителей и облегчить условия ремонта станков у потребителей.

6.9 Совершенствование систем управления и эксплуатации станков, разработка новых адаптивных систем управления

Проведены исследования, синтез и анализ новых адаптивных систем управления. Разработаны дополнительные адаптивные модули для осуществления адаптивного управления процессом обработки с компенсацией упругих и температурных деформаций элементов несущей системы станка, заготовки, для осуществления предельного и оптимального регулирования режимов работы станков.

Значительное количество исследований в тяжелом станкостроении была посвящена исследованию и совершенствованию регулируемого в широком диапазоне привода постоянного тока для главного движения и подачи.

Бесступенчатое регулирование параметров резания имеет ряд бесспорных эксплуатационных преимуществ: возможность выбора эффективных режимов, возможность регулирования скорости и толщины стружки без остановки станка, обеспечивающие существенное повышение производительности и максимальную устойчивость инструмента.

Применение регулируемого привода облегчает задачу полного дистанционного управления станками и дает возможность осуществлять от того же привода установочные перемещения рабочих органов с минимальной скоростью.

Исследованы устойчивость системы, схемные решения, обеспечивающие ее стабилизацию, выявлены влияния отдельных параметров элементов системы (постоянных времени и коэффициентов усиления) на качество регулирования.

Результатом проведенного исследования стало определение условий устойчивости работы системы во всем диапазоне скоростей, что обеспечило оптимальные режимы работы главного привода, а, следовательно, позволило повысить производительность и эксплуатационную надежность станков.

Отработаны удобные и эргономично обоснованные системы управления тяжелыми станками. Последовательное совершенствование элементов и систем управления позволило отработать общие принципы их проектирования, предусматривающие полное управление всеми рабочими органами тяжелых станков с одного удобно расположенного или "перемещенного" в удобное место рабочей зоны пульта.

Проектирование, исследование и создание надежных систем и точных датчиков измерения величины перемещения на большие длины позволило создавать на базе этих элементов системы программного управления тяжелыми станками, сосредоточить приборы отчета на рабочем пульте и таким радикальным образом улучшить условия обслуживания станков.

Ряд проектно-конструкторских и исследовательских работ был осуществлен с применением к проектированию тяжелых станков принципов эргономики и технической эстетики.

Изучение физиологических особенностей человека, обслуживающего тяжелый станок, позволило создать определенные рекомендации по проектированию станков наиболее удобных внешних форм, по расположению на станках органов управления, по созданию кинематических схем построения пультов управления станками, а также ряда других рекомендаций.

Проведенные работы по совершенствованию методов выверки и крепления крупногабаритных деталей, а также работы по изменению и регулированию инструмента на тяжелых станках велись не только по экономическим соображениям, но и с целью облегчения условий труда рабочего.

Исследования проводились несколькими параллельными путями. Для механизации выверки и крепления деталей были спроектированы, изготовлены

и испытаны гидромеханические ключи, развивающие крутящий момент до 6000-8000 Н·м, гидроключи с цилиндром, зажимные кулаки с червячным усилителем крутящего момента, позволяющие выставлять изделие с точностью до 0,02 мм.

Для закрепления инструмента были спроектированы, изготовлены и испытаны различные механизмы.

Механизмы выверки, крепления деталей, а также механизмы закрепления инструмента были испытаны на стендах ускоренных испытаний, с целью отработки наиболее долговечной конструкции.

С целью сокращения времени на измерение диаметров было спроектировано, изготовлено и испытано устройство для измерения больших диаметров на ходу станка по методу обката мерным роликом с электронным счетным устройством. Диаметры до 10000 мм могут быть измерены с точностью до 0,05 мм.

6.10 Инновационные составляющие

Проведенные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию, освоению серийного производства и внедрению тяжелых токарных станков нового поколения повышенной точности обработки изделий являются основой внедрения инноваций для нужд машиностроения, металлургической, горнорудной, химической коксохимической отраслей, транспорта, топливно-энергетического комплекса.

Инновационные продукты позволяют обеспечить:

- выпуск новой продукции;
- повышение точности обработки деталей;
- повышение качества продукции;
- повышение производительности труда;
- сокращение импортной зависимости;
- повышение темпов роста заработной платы;
- повышение надежности работы станков;
- загрузки основного производственного оборудования.

Инновационная продукция по своим техническим характеристикам находится на уровне, а по некоторым техническим решениям превышает лучшие мировые аналоги.

Комплексный подход при выполнении научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических работ позволяет повысить качество и точность обработки до уровня, соответствующего мировым стандартам, увеличить производительность труда в тяжелом машиностроении, металлургической, энергетической отраслях и железнодорожном транспорте.

Кроме изложенных в предыдущих разделах результатов, инновационными составляющими при создании тяжелых токарных станков новой гаммы являются:

1. Технологические:

- технологии изготовления прецизионных деталей с высокими эксплуатационными характеристиками, методы обработки зубчатых колес, валов, направляющих с высокой твердостью и прочностью;
- высокоточная технология измерения с лазерной выверкой узлов машинного оборудования; безззорное соединение сборных деталей с применением молекулярных металлов;
- компьютерная вибродиагностика работы механизмов станков;
- сварка и наплавка в специальной среде;
- межоперационная вибростабилизация деталей на резонансных частотах;
- применение адаптивной инструментальной оснастки;
- исследование динамической устойчивости станков при обработке различных марок сталей и сплавов;
- применение для сварных конструкций сталей повышенной прочности;
- обработка сложных корпусных деталей с пяти сторон с автоматической сменой инструмента и обеспечением 6 качества точности с одной установки;

- обработка с высокой точностью геометрических форм, заменяющая шлифование;
- обработка с особо высокой точностью взаимосвязанных отверстий на корпусах всех типов;
- обработка базовых деталей станков с достижением высоких точностных параметров;
- обработка зубчатых колес с сокращением времени изготовления и повышением степени точности до 5 класса;
- оптимизация режимов резания с применением современных инструментов при сверлении, расточке, разворачивании отверстий и нарезании резьбы;
- применение современных информационных технологий при проведении проектно-конструкторских и технологических работ.

2. Конструкторские:

- новые адаптивные системы управления;
- опорные узлы и передачи жидкостного трения;
- конструкция направляющих суппортов с опорами качения и синтетическим антифрикционным покрытием;
- балансировочное приспособление элементов шпиндельной бабки;
- контроль осевого усилия зажима изделия в центрах с помощью датчиков;
- суппорты с шарико-винтовыми передачами; автоматический центроискатель;
- резцовые кассеты, соответствующие международным стандартам;
- конструкция инструмента и державок, предусматривающая подачу СОЖ в зону резания;
- суппорты с контролируемым усилием накатки и поворотом оси накатного ролика;

- диагностика технического состояния ответственных узлов с дисплейным отражением и указанием действий оператору;
- инструментальное модульное оснащение с режущими пластинами из твердого сплава с покрытиями и инструментом из сверхтвердых материалов.

Повышение точности тяжелых станков достигнуто на основе разработки узлов и систем адаптивного управления, использованием лазерной установки для проверки точностных параметров станков. Система адаптивного управления предназначена для компенсации неточностей изготовления и сборки, а также упругих и тепловых деформаций длинномерных направляющих, конечных звеньев приводов подачи и ориентирована на применение в тяжелых станках с ЧПУ. Ее применение наиболее актуально для сложных и нежестких направляющих, где достижение требуемой точности классическими методами является достаточно трудоемким. Кроме того, предложенную систему можно рекомендовать для модернизации уже существующего станочного оборудования с целью повышения его точности или компенсации износа. Система реализует принцип адаптивного управления компенсационным приводом по сигналу рассогласования реального и требуемого положения подвижного органа, например, привода подачи. Измерение величины несогласованности осуществляется с использованием измерительной базы лазерного луча.

Исследование, разработка и внедрение технологии формообразования подшипниковых опор шпинделей станков производится на базе молекулярных металлов. Молекулярный металл – двухкомпонентный регенерационный материал, изготовленный на базе эпоксидных смол с высокими показателями твердости, термостойкости и химической стойкости. Рабочий диапазон для молекулярных металлов 250-300° С. Технология позволяет повысить точность и качество сборки подшипниковых узлов шпиндельной оси станков за счет компенсации отклонений геометрических размеров соединяемых поверхностей молекулярным металлом.

Для изготовления крупногабаритных узлов несущей системы тяжелых станков применены технологии сварки в смеси аргона и углекислого газа, использование порошковых проволок, импульсно-дуговой сварки. Сварка в слабоактивных газовых смесях на основе аргона и углекислого газа позволяют улучшить качество сварных швов, снизить энергетические затраты на сварку, уменьшить уровень деформаций и остаточных напряжений. Способы сварки с применением порошковых материалов и плазменных процессов позволяют расширить технологические возможности сварки и наплавки, получить наплавленный металл со специальными свойствами по прочностным и износостойким характеристикам.

Для снятия внутренних напряжений деталей применены технологии вибростабилизации на резонансных частотах с отработкой стабилизации размеров корпусных и базовых деталей.

Используются модульные системы крепления инструмента, обеспечивающие точную установку инструмента без выверки, с локальной подачей СОТС в зону резания, что позволяет применять инструментальные системы ведущих фирм (Sandvik Coromant, KORLOY и др.).

Применяются результаты исследования динамической устойчивости станков при обработке различных марок сплавов и сталей, что обеспечивает высокую эксплуатационную характеристику станков и высокое качество обработки.

6.11 Результаты внедрения работы на ПАТ НКМЗ и других предприятиях тяжелого машиностроения

Публичное акционерное общество "Новокраматорский машиностроительный завод" - одно из крупнейших машиностроительных предприятий Украины, специализирующееся на выпуске прокатного, металлургического, кузнечно-прессового, горнорудного, подъемно-транспортного, специализированного оборудования, поковок, отливок и тому подобное. Машины и оборудование завода работают более чем в 50 странах

мира, в том числе США, Франции, Румынии, Болгарии, Италии, Австрии, Бельгии, Японии, Канаде, Германии, Турции, Сирии и др.

С развитием металлургической, энергетической, транспортной отрасли усиливаются требования к валкам, повышается точность их изготовления, применяются новые марки сталей, которые позволяют добиться высоких эксплуатационных характеристик.

На ПАО НКМЗ в период с 2002 по 2011 годы поставлено 19 тяжелых токарных станков производства ПАО КЗТС моделей КЖ16274ФЗ и КЖ16275ФЗ на сумму 106,163 млн. грн. (табл. 6.5).

Табл. 6.5. Количество тяжелых токарных станков производства ПАО КЗТС моделей КЖ16274ФЗ и КЖ16275ФЗ, поставленные на ПАО НКМЗ

№ п\п	Цех	Инв. №	Модель	Наименование	Характеристика	Год установки
1	Мх 3	13500	КЖ16274ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф1300х6000	2002
2	Мх 3	13965	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х8000	2002
3	Мх 5	18426	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х8000	2002
4	Мх 3	13966	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х8000	2003
5	Мх 5	18428	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х8000	2003
6	Мх 3	13967	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х8000	2004
7	Мх 3	13971	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х6000	2004
8	Мх 5	18432	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х8000	2004
9	Мх 5	18440	КЖ16275ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2000х18000	2005
10	Мх 1	18319	КЖ16274ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф1300х6000	2007
11	Мх 2	13663	КЖ16274ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф1300х10000	2007
12	Мх 12	18715	КЖ16274ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф1300х6000	2007
13	Мх 3	13665	КЖ16274ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф1300х6000	2008
14	Мх5	18717	1К675ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2500х12500	2008
15	Мх1	18321	1К670ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2050х10000	2010
16	Мх5	13672	1К675ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2550х10500	2010
16	Мх18	14078	КЖ16165ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2300х8000	2010
17	Мх18	14079	КЖ16165ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2300х8000	2010
18	Мх3	13674	КЖ16165ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2300х8000	2011
19	Мх5	13673	1К675ФЗ	Токарный с ЧПУ	Ф2550х12500	2011

Разработка, создание, освоение серийного производства и внедрения тяжелых токарных станков моделей КЖ16275ФЗ и КЖ16274ФЗ обеспечивает:

- повышение точности обработки изделий - снижение радиального и торцевого биения до 0,01 мм, достижение некруглости и нецилиндричности в пределах 0,008-0,01 мм, шероховатости поверхности до Ra 0,8 мкм.
- проведение обработки изделий сложного профиля в автоматическом режиме;
- возможность производить нарезание резьбы с любым шагом (в диапазоне от 0,1 до 300 мм);
- повышение производительности труда в результате высокой степени автоматизации процесса обработки;
- снижение трудоемкости изготовления изделий;
- применение прогрессивного высокопроизводительного инструмента;
- снижение расходов на изготовление трудоемкого и дорогостоящего оснащения для обработки деталей со сложными формами профилей поверхности;
- распространение номенклатуры изготовленных изделий, в частности, прокатных валков, и, как следствие, увеличение доли экспортируемой продукции отечественного производства;
- повышение профессиональной подготовки персонала: конструкторов, технологов, программистов, станочников и др.
- значительное улучшение условия труда станочников, и достижение высокого уровня техники безопасности на предприятии.

Средняя стоимость одного нормо-часа составляет около 133 грн. Таким образом, экономия за счет трудоемкости составляет:

$$\frac{179530 \times 133}{10 \text{ лет}} \approx \mathbf{2388} \text{ тыс. грн. в год.} \quad (6.2)$$

Показатели эффективности эксплуатации тяжелых токарных станков с ЧПУ на ПАО НКМЗ представлены в таблице 6.6.

За время эксплуатации станки показали себя как надежные, удобные в работе машины, способные с высокой степенью точности обрабатывать детали по предварительно составленной программе.

Табл. 6.6. Эффективность эксплуатации тяжелых токарных станков с ЧПУ на ПАО НКМЗ

Год	Отработано, нормо-часов	Достигнутое снижение трудоемкости, нормо-часов	%
2003	21868	7209	33
2004	44627	13062	29
2005	53233	17744	33
2006	53919	16176	30
2007	60565	18170	30
2008	81 087	24 326	30
2009	74 689	21 660	29
2010	55 407	17 176	31
2011	84 361	25 308	30
2012	64 481	18 699	29
Всего:	594 237	179 530	30

Станки моделей КЖ16275ФЗ и КЖ16274ФЗ имеют все необходимые возможности и характеристики для изготовления конкурентоспособной продукции, что подтверждено их успешным применением в течение более 10 лет (рис. 6.17 – 6.20).

Характеристики деталей, обрабатываемых на станках производства КЗТС, приведены в таблицах 6.7, 6.8.

Экономическая эффективность, выраженная в увеличении объема товарной продукции, представлена в таблице 6.9.



Рис. 6.17. Обработка тяжелых деталей в цехах АО НКМЗ на станке мод. КЖ16274ФЗ

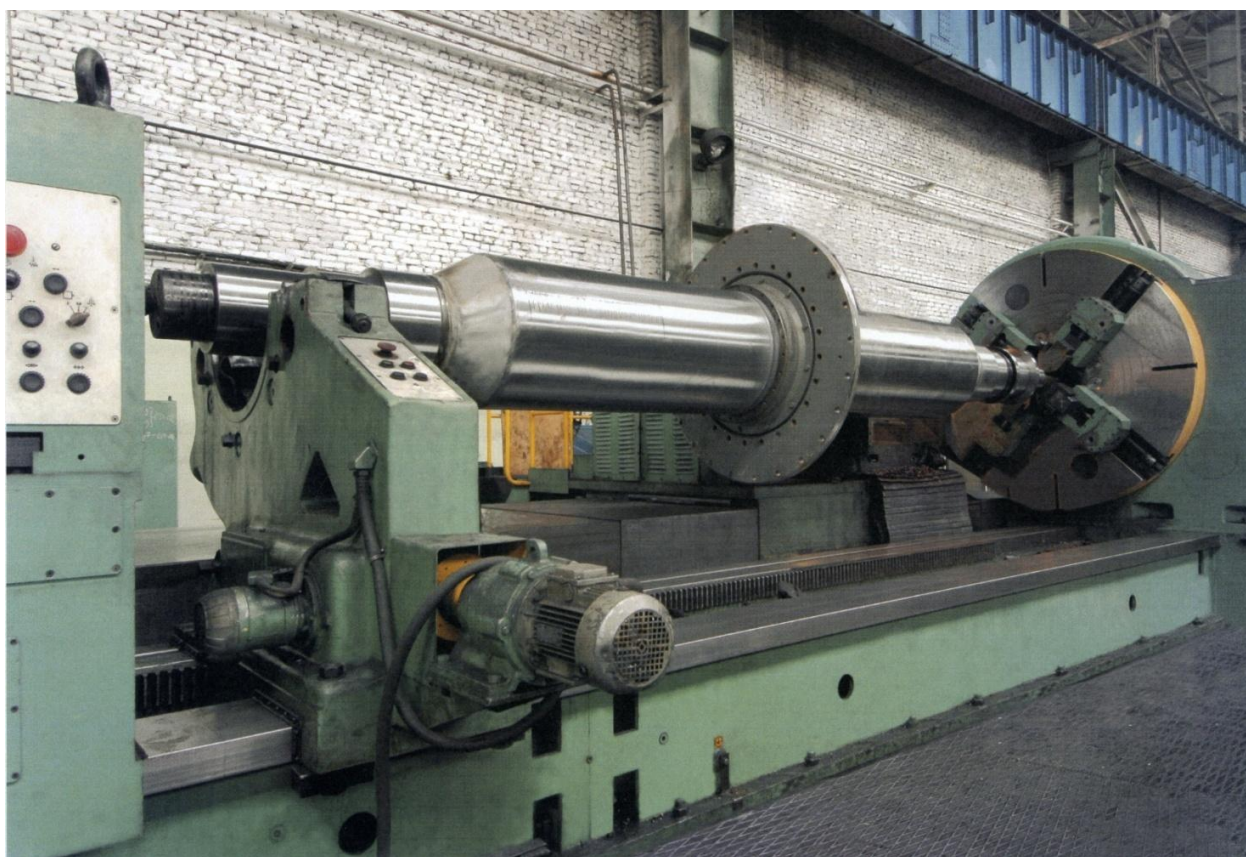


Рис 6.18. Обработка тяжелых деталей в цехах ПАО НКМЗ на станке
мод. КЖ16275ФЗ

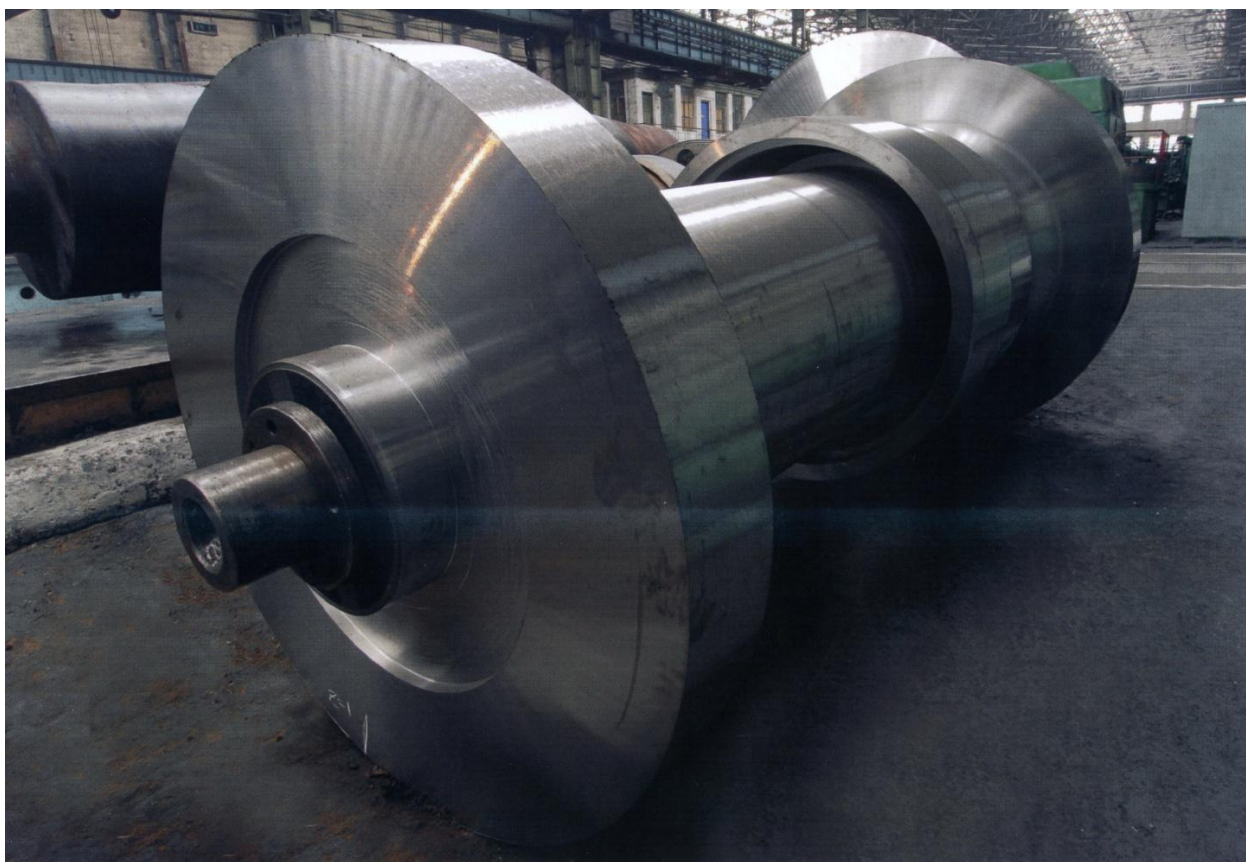


Рис. 6.19. Крупногабаритные роторы, обработанные на станках моделей КЖ16274Ф3 и КЖ16275Ф3

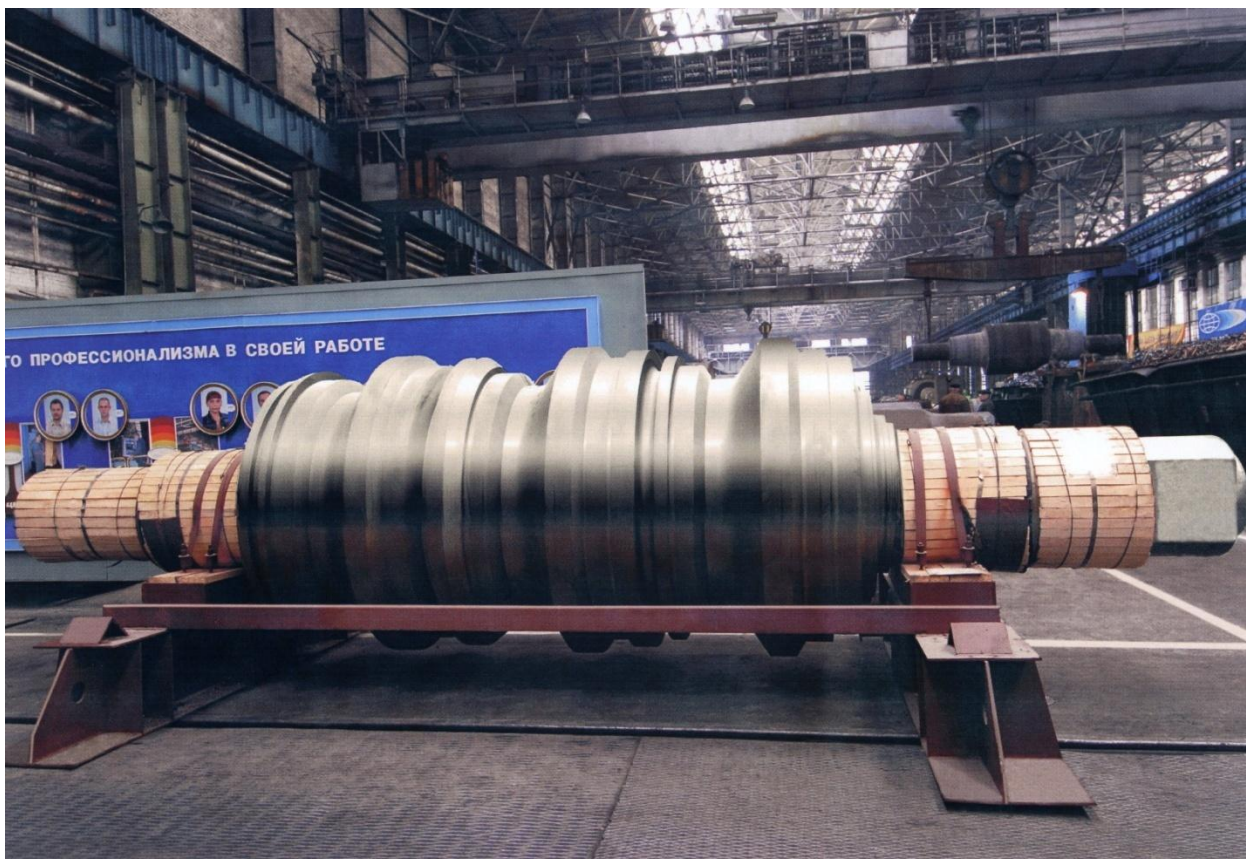


Рис. 6.20. Валки прокатных станов, обработанные на станках моделей
КЖ16274Ф3 и КЖ16275Ф3

Табл. 6.7. Номенклатура валков, обрабатываемых на станке КЖ16274Ф3

Габаритные размеры валков Ø бочки / L бочки / L детали	Масса обрабатываемых валков, т	Материал обрабатываемых валков	Твердость бочки и шеек	Точность обрабатываемых валков	Шероховатость поверхностей
1000x2500x5700 900x2000x4800 600x1800x4600 500x1700x4300 450x1500x3700	от 1,8 до 12	Ст50, 60ХН, 50ХН, 60Х2СМФ, 75Х2МФ, 60Х2С2МФ, 90ХФ, 80Х3МФ, 80Х5МФ, 70Х3ГНМФ	Бочки и шеек до 320НВ Бочки от 60 до 100 НВ Шеек до 30 до 55НВ	Биение бочки и шеек от 0,02мм до 0,005мм	от Ra3,2 до Ra0,4

Табл. 6.8. Номенклатура валков, обрабатываемых на станке КЖ16275Ф3

Габаритные размеры валков Ø бочки / L бочки / L детали	Масса обрабатываемых валков, т	Материал обрабатываемых валков	Твердость бочки и шеек	Точность обрабатываемых валков	Шероховатость поверхностей
1600x2700x6700 1500x2500x6300 1400x2000x5500 1200x1200x5000 1100x1500x4800	от 12 до 60	Ст50, 60ХН, 50ХН, 75Х2МФ, 75ХМФ, 90ХФ, 70Х3ГНМФ	Бочки и шеек, до 320НВ Бочки от 60 до 85 НВ Шеек от 30 до 55НВ	Биение бочки и шеек от 0,05мм до 0,005мм	от Ra3,2 до Ra0,4

Использование новых станков производства ПАО КЗТС с применением инструментальной оснастки на основе созданных новых инструментальных материалов, упрочняющих покрытий на режущих инструментах и современных технологий механической обработки позволяет ежегодно увеличивать выпуск прокатных валков, поставляемых металлургическим предприятиям Украины и на экспорт во многие страны мира (до 75% выпуска).

Табл. 6.9. Экономический эффект, достигнутый за счет ввода в эксплуатацию тяжелых токарных станков с ЧПУ производства ПАО КЗТС на ПАО НКМЗ

Год	Валы холодной и горячей прокатки		
	Масса , т	Стоимость, млн. грн.	Прибыль предприятия, млн. грн.
2002	13 946	112, 346	21, 903
2003	25 283	188, 793	36, 958
2004	28 564	235, 336	46, 463
2005	31 054	322, 838	65, 447
2006	30 957	405, 758	85, 412
2007	31 436	509, 214	102, 783
2008	32 520	714, 983	143 324
2009	34 146	750 732	152 051
2010	36 536	803 283	164 759
2011	39 094	859 513	171 933
2012	40 267	885 299	177 725
Итого: рост по отношению к 2002 (в абс. выражении)	18 574	772 953	155 822
Итого: рост по отношению к 2002 (%)	233,19	788	811

Благодаря реализации большего объема изготовленной валковой продукции и энергетического оборудования, предприятие получило возможность добиться роста прибыли в среднем на:

$$\frac{155822}{10\text{лет}} \approx 15\,582 \text{ тыс. грн. в год.} \quad (6.3)$$

Благодаря реализации большего объема выпускаемой валковой продукции, предприятие получило возможность достичь прироста прибыли в среднем на:

$$\frac{106164}{10\text{лет}} \approx 10\,616 \text{ тыс. грн. в год.}$$

Экономический эффект от внедрения тяжелых токарных станков составляет:

$$2388 + 15582 - 10616 = 7354 \text{ тыс. грн. в год.} \quad (6.4)$$

На рисунке 6.21 показана динамика повышения объемов производства прокатных валков на ПАО НКМЗ с применением станков мод. КЖ16275ФЗ и КЖ16274ФЗ.

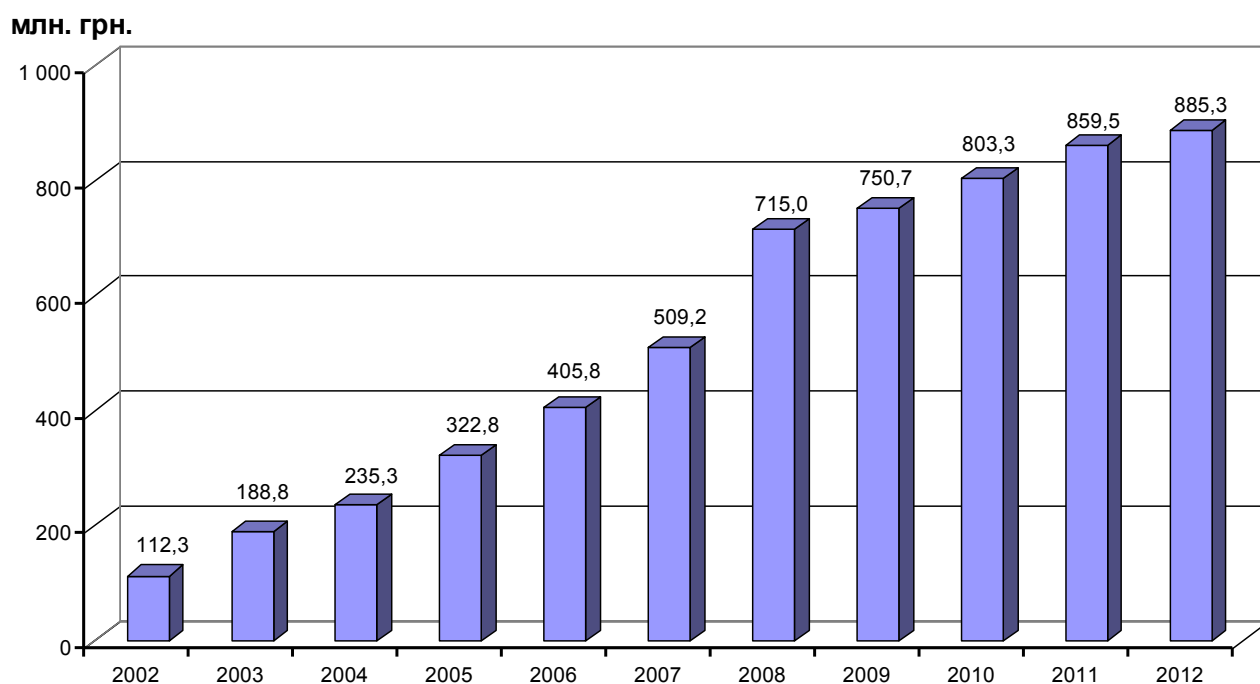


Рис. 6.21. Динамика повышения объемов производства прокатных валков на ПАО НКМЗ

В 2012 году ПАО НКМЗ на станках мод. КЖ16275ФЗ и КЖ16274ФЗ изготовлено 3300 т прокатных валков для США, 10000 т – для Китая, 10 000т – для Индии, а также валки для Румынии, Аргентины и других стран.

Изготавливаются уникальные роторные валы (диаметром 1600 мм, длиной 2500 мм, массой 7,7 т) и детали для комплектации ветровых энергетических установок (рис. 6.22), как альтернативного направления, направленного на энергосбережение, в рамках крупного международного энергетического проекта по созданию ветровых электростанций для США, Германии, Голландии.

В 2012 году этой продукции только на ПАО НКМЗ изготовлено 230 единиц общей массой более 4000 т.

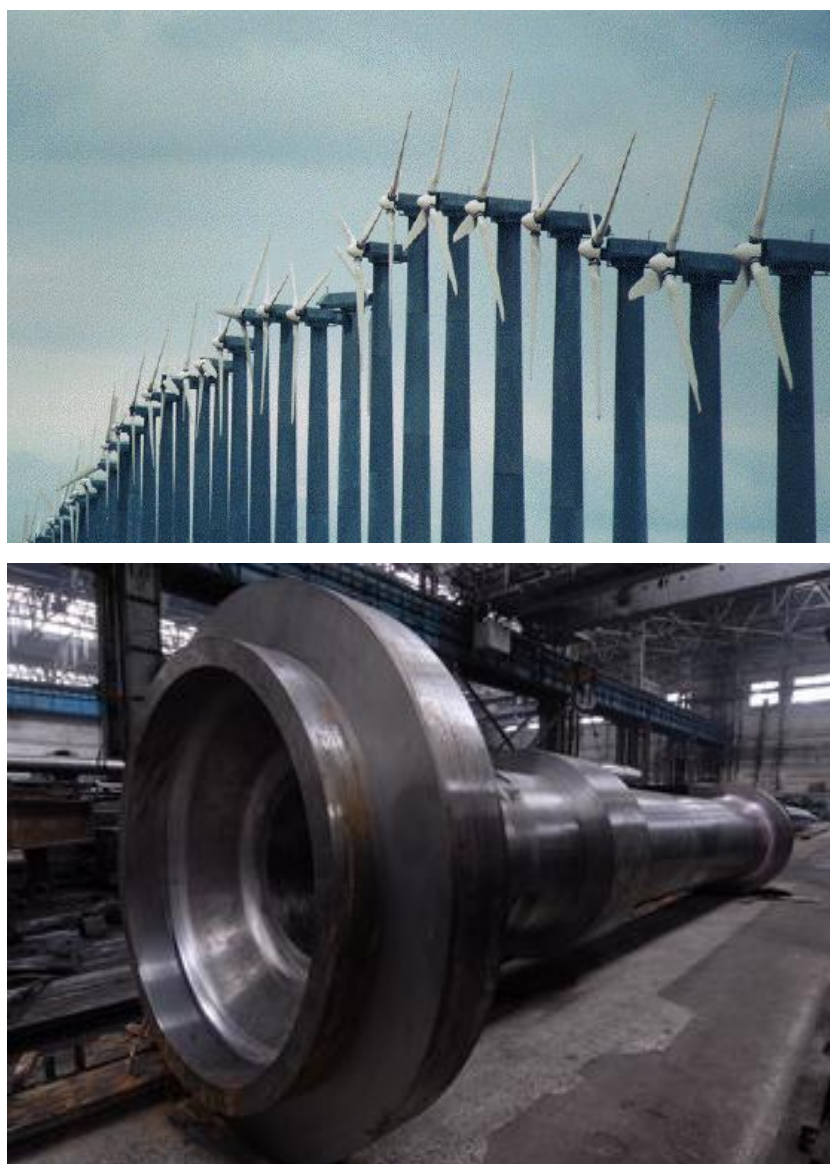


Рис. 6.22. Крупногабаритные роторные валы, изготовленные в условиях ПАО НКМЗ и ПАО КЗТС на станках мод. КЖ16274ФЗ и КЖ16275ФЗ для ветровых энергетических установок

Рост суммарной мощности ветроэнергетики в Украине связано с созданием ряда ветропарков, таких как ООО "Ветровой парк Очаковский" - 25 МВт. Установление таких ветроэнергетических установок планируется также в Одесской и Николаевской областях. Проектная мощность этих ветровых электростанций составит 600 МВт.

Техническое обеспечение строительства и функционирования энергетического оборудования ветровых парков Украины осуществляется благодаря разработке уникального тяжелого высокоточного оборудования, что позволяет решать сложные технические задачи.

На ПАО НКМЗ изготавливаются также крупногабаритные гребные валы (длина до 15 м, масса до 25 т) для Германии, Голландии, Китая и др. (рис. 6.23).



Рис. 6.23. Обработка гребных валов

На созданных тяжелых токарных станках с ЧПУ повышенной точности изготавливаются наиболее крупные и ответственные детали сверхмощных турбин на Харьковском турбинном заводе ОАО «Турбоатом» (рис. 6.24), Южно-турбинном заводе "Зоря-МАШПРОЕКТ" (рис. 6.25), детали генераторов, энергетических установок морских судов и других машин практически без ограничения размеров, массы и точности.



Рис. 6.24. Турбины производства Харьковского турбинного завода АО «Турбоатом», обработанные на тяжелых станках производства ПАО КЗТС



Рис. 6.25. Расточка внутренней криволинейной поверхности газовой турбины, выполняемая на тяжелых токарных станках с ЧПУ производства ПАО КЗТС

Выводы по разделу 6

1. Разработанные на основе проведенных комплексных исследований тяжелые токарные станки с ЧПУ повышенной точности производства ПАО "Краматорский завод тяжелого станкостроения" по своим техническим характеристикам находятся на уровне лучших зарубежных аналогов.

2. Эффективность эксплуатации тяжелых токарных станков обеспечена использованием разработанной новой системы адаптивного управления с программируемыми логическими контроллерами и мехатронными элементами.

3. На основании результатов исследований настоящей работы разработаны и внедрены в производство методика статистических исследований предприятий, критерии и принципы создания и функционирования новых тяжелых станков, системы адаптивного оптимального управления процессом экологически эффективной обработки на тяжелых станках, общемашиностроительные нормативы режимов резания для точения. Фактический экономический эффект от результатов внедрения работы ПАО „НКМЗ” составляет 361 тыс. 700 грн.

4. Результаты работы внедрены при создании тяжелых токарных станков нового поколения, выпускаемых ПАО «Краматорский завод тяжелого станкостроения», разработаны и внедрены системы адаптивного управления и программные продукты для выбора регламентов эксплуатации тяжелых станков, которыми укомплектованы станки, при поставке их потребителю. Экономический эффект от внедрения их в расчете на один станок составляет 108 тыс. грн.

5. Результаты работы внедрены при модернизации тяжелых токарных станков на ООО «Тяжстанкосервис» с экономическим эффектом 146 тыс. грн. на один тяжелый станок.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований решена актуальная научно-техническая проблема, имеющая важное промышленное значение, которая заключается в разработке научных основ проектирования станков для обработки деталей тяжелого машиностроения на основе адаптивного управления. Разработаны технологические основы проектирования нового металлорежущего оборудования с программным управлением, специализированного на изготовлении распространенных в производстве групп деталей экономически целесообразной сложности и оперативного выбора рационального оборудования из существующего типажа станков для определенных производственных условий. Решение проблемы позволило повысить производительность на 30-45%, точность в 3-4 раза и надежность изготовления деталей тяжелого машиностроения на 20 - 25%.

2. Анализ эксплуатации тяжелых токарных станков с ЧПУ на предприятиях тяжелого машиностроения показал, что их технологическая насыщенность не всегда соответствует конструктивно-технологическим характеристикам обрабатываемых деталей. Размеры рабочего пространства станков до 3-х раз превышают габаритные размеры деталей, количество формообразующих движений и инструментов в магазине также бывают завышенными. Это приводит к повышению материало- и энергоемкости станков, повышению себестоимости изготовления деталей до 50%.

Разработана методология оценки и выбора технологической насыщенности тяжелых токарных станков с ЧПУ в соответствии с производственно-технологическими условиями их эксплуатации, от которых во многом зависят потребительские свойства выбранного технологического оборудования. Исследованы зависимости технологической насыщенности станков с ЧПУ от геометрических (форма и сочетание поверхностей, размеры и т.д.), технологических (точность, материал и т.д.) и организационно - плановых

(программа выпуска, трудоемкость обработки и т.д.) характеристик деталей машин и технологии их обработки, которые положены в основу разработанной методики проектирования.

3. Статистические исследования параметров обработки деталей на тяжелых станках осуществлялись с помощью разработанной информационной базы знаний, которая насчитывает более 5000 прецедентов. Программное обеспечение базы знаний позволяет осуществлять группировку данных по заданному признаку, определять параметры законов распределения, проводить регрессионный и корреляционный анализ данных. Установлено, что распределение основных параметров обработки в зависимости от типоразмера станка не противоречит логарифмически-нормальному закону. Разработанный метод поэтапного группирования деталей на основе свертки классификационных группировок и кластерного анализа в зависимости от сложности деталей по количеству формообразующих движений позволяет определить группы деталей - представителей предприятий тяжелого машиностроения в результате пошагового объединения кластеров.

4. Впервые на основании статистических исследований параметров механической обработки предложена концепция структурно-параметрического синтеза конструкций тяжелых станков, которая позволяет определить рациональные параметры тяжелых станков, учитывающие реальные производственные условия. Установлены необходимые конструктивные параметры тяжелых токарных станков, которые связаны с размерами обрабатываемых деталей и режимами резания, обоснована целесообразность создания станков по модульному принципу. Проанализированы типовые детали, которые обрабатываются в условиях предприятий тяжелого машиностроения. Так, для ПАО НКМЗ сформировано три группы деталей - представителей на основе кластерного анализа габаритных размеров и количества необходимых формообразующих движений. В результате анализа деталей-представителей установлены требования к конструкции

металлорежущего оборудования для конкретных условий предприятия, определены параметры наиболее рациональных конструкций тяжелых токарных станков: 1) $D_{\max} = 1250$ мм, $L_{\max} = 6000$ мм, грузоподъемность 25 т, 2) $D_{\max} = 2000$ мм, $L_{\max} = 8000$ мм, грузоподъемность 60 т.

5. Оптимизация режимов резания осуществлялась по экономическому критерию (приведенные затраты), производительности, надежности. Состав целевых функций и их весовые коэффициенты зависят от потребностей производства. Ограничениями выступают прочность и жесткость режущего инструмента, точность обработки, мощность электропривода главного движения станка, заданная производительность станка, наименьшая и наибольшая скорость резания, обусловленная прочностью станка.

6. Проведена экспериментальная проверка оптимальных параметров процесса резания. Установлены взаимосвязи между режимами резания и параметрами технологической системы. Получены новые стойкостные зависимости, положенные в основу системы оптимального управления, которые впервые учитывают особенности обработки деталей на тяжелых станках с ЧПУ (вероятность разрушения инструмента, уровень его надежности). Впервые разработаны нормативы режимов резания для тяжелых токарных станков с ЧПУ. Разработаны и внедрены комплексные нормировочные карты и программное обеспечение для выбора регламентов эксплуатации инструмента для тяжелых станков с ЧПУ, производимых ОАО КЗТС. Разработанные математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов резания позволяют корректировать их в реальном времени работы тяжелого станка с ЧПУ на основании оперативной информации, полученной из зоны резания.

7. Установлено, что при разработке кинематики движений рабочих органов станка при новом подходе необходимо руководствоваться принципом «на каждое простое движение необходим собственный привод», а все согласования этих движений следует реализовывать электронными и

программными средствами. Применение программных средств позволяет реализовать практически любые линейные и нелинейные передаточные функции, а также функции, заданные табличным и алгоритмическим способом.

Причем, параметры этих функций и те же функции могут оперативно изменяться, как оператором при настройке станка, так и в процессе работы станка по разным сигналам адаптивного управления.

8. На основе алгоритмов оптимального управления технологической системой с элементами искусственного интеллекта впервые созданы системы адаптивного оптимального управления тяжелыми токарными станками с использованием программируемых логических контроллеров и мехатронных элементов.

9. На основании результатов исследований разработаны и внедрены в производство: методика статистических исследований параметров механической обработки, критерии и принципы создания и функционирования новых тяжелых станков, системы адаптивного оптимального управления процессом обработки на тяжелых станках, нормативы режимов резания для точения. Фактический экономический эффект от результатов внедрения работы на ОАО "НКМЗ" представляет. 361,7 тыс. грн.

Результаты работы внедрены при создании тяжелых токарных станков нового поколения, выпускаемых ОАО «КЗТС», разработаны и внедрены системы адаптивного управления и программные продукты для выбора регламентов эксплуатации тяжелых станков. Экономический эффект от внедрения их в расчете на 1 станок составляет 108 тыс. грн. Повышена точность деталей, обработанных на этих станках: по осевому биению - в 3 раза, по радиальному биению - в 4 раза, по стабильности отклонений в поперечном сечении деталей - в 2,3 раза, по плоскостности торцевой поверхности деталей - в 1,5 раза. Производительность обработки крупногабаритных ответственных деталей повышена на 30-45%.

Результаты работы внедрены при модернизации тяжелых токарных станков на ООО «Тяжстанкосервис» с экономическим эффектом 146 тыс. грн. на один тяжелый станок.

Результаты работы внедрены в учебный процесс ДГМА.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / под ред.: Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. - М.: Машиностроение, 1986. – 254 с.
2. Адаптивні елементи керування важкими верстатами: монографія / Васильченко Я. В., Ковальов В. Д., Мельник М. С., Гаков С. О., Пономаренко О. В. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – 122 с.
3. Анализ компоновок металлорежущих станков. Врагов Ю.Д. М.: Машиностроение, 1978. — 208 с.
4. Анельчик Д.Є., Швець С.В., Луців І.В., Дубецький І.Д. Система різання: фізичні основи оптимізація / Під. ред. І.В. Луціва. – Одеса-Тернопіль: ТДТУ, 2000. – 145с.
5. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: Справ. изд. – М.: Финансы и статистика, 1983.- 471 с.
6. Базров Б. М. Технологический подход к описанию конструкции / Базров Б. М. // Научные технологии в машиностроении. - 2015. - № 5. - С. 24-28.
7. Базров Б. М. Определение технологических возможностей станка / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 2007. – №3. – С. 31.
8. Балакшин Б. С. Использование систем адаптивного управления для повышения точности и производительности обработки / Б. С. Балакшин // Станки и инструмент. – 1972. – №4.
9. Башков В. М., Кацев П. Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. М.: Машиностроение, 1985. - 136с.
10. Брахман Л. А., Батищев Д. И., Гильман А. М. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1972. -140с.
11. Вайс С. Д., Корниенко А. А. Оценка конкурентоспособности металлорежущих станков // СТИН. – 2002. - №1. - С.8.

12. Васильченко Я. В. Вплив обробки імпульсним магнітним полем на втомлену міцність твердих сплавів / Васильченко Я. В. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – № 2 (33). – 280с. - С.23-27.

13. Васильченко Я.В. Выбор оптимальных режимов резания при автоматическом управлении тяжелыми станками / Васильченко Я.В., Ковалев В.Д. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Вип. 20. – Краматорськ. – 2006. – С. 48-53.

14. Васильченко Я.В. Оперативная оптимизация процесса резания при обработке крупногабаритных деталей // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 8(190). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 26-34.

15. Васильченко Я.В. Определение рациональных технических параметров новых станков на базе статистических исследований предприятий тяжелого машиностроения / Васильченко Я.В. // Вестник СевНТУ. Машиноприборостроение и транспорт. – №11, 2010. – С.26-30.

16. Васильченко Я.В. Оптимизация процесса резания на тяжелом токарном станке и его автоматизация за счет моделирования процесса резания / Васильченко Я.В., Савелов Д.В., Савелова И.К. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №30, 2012. – С.336-345.

17. Васильченко Я.В. Повышение эффективности обработки на тяжелых станках за счет эксплуатационных свойств элементов технологической системы / Васильченко Я.В. // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. науч. трудов. – Краматорск, вып. №26, 2010. – С. 108-111.

18. Васильченко Я.В. Повышение эффективности сборного режущего инструмента путем отработки технологии его выбора и сквозного проектирования / Васильченко Я.В., Нечепуренко А.В. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА. – 2005. – Вип. 17. – С.88-93

19. Васильченко Я.В. Разработка и применение инструмента для адаптивных технологических систем на тяжелых станках // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА. –2006. – Вип. 18. – С. 27-31.

20. Васильченко Я.В. Розробка інформаційних технологій для систем адаптивного управління процесом обробки деталей на важких верстатах // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2009. – С.176-182.

21. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

22. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 1993. – 335 с.

23. Внуков Ю, Дубровин Г., Табунщик Г. Керування якістю і зниження варіабельності // Стандартизація, сертифікація, якість.- 1999.- N 4.- С.42-43

24. Внуков Ю. Н., Дубровин В. И., Табунщик Г. В. Работоспособные методы обеспечения качества при проектировании // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века. Сборник трудов в 3х т. Т1. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – С. 140 – 141.

25. Внуков Ю., Дорошенко Ю., Дубровин В. Стандартизація у сфері управління якістю// Стандартизація, сертифікація, якість. - 2001.- N 2.- С.24-27

26. Выбор компоновок агрегатированных многоцелевых станков. Аверьянов О.И., Гельштейн Я.М. Станки и инструмент. - 1987. - N 12.

27. Высочина А. И. Разработка тяжелого токарного станка для обработки роторов ветрогенераторов на основе исследования технологических условий заводов тяжелого машиностроения / Высочина А. И., Ковалев В. Д., Васильченко Я. В. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №30, 2012. – С. 121-126.

28. Гавриш А.П., Ефремов А.И. Автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства.- К.: Техника, 1982.- 215 с.

29. Гибкое автоматизированное производство/ В. О. Азбель, В. А. Егоров, А. Ю. Звоницкий и др., под общ. ред. С. А. Майорова. - Л.: Машиностроение, 1985. - 454с.
30. Гильман А. М. и др. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1972. – 188 с.
31. Гнеденко Б. В. Математические методы теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев – М.: Наука, 1965. – 524 с.
32. Грабченко А.И. Современные тенденции развития машиностроительного производства и подготовка специалистов // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: ХГПУ, 1995-1996.- С.236-244.
33. Грановский Г. И. О стойкости инструмента как исходном параметре для расчета режимов резания / Г. И. Грановский // Вестник машиностроения. – 1965. №8.
34. Грановский Г. И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с, ил.
35. Гришин С. А. Применение алгоритмов самообучения к оптимизации процесса резания на примере токарной и сверлильной обработки: дис. ... канд. техн. наук / ТулГУ, 2000. – 238с.
36. Гузенко В.С., Коткин Г.Г., Миранцов С.Л. Общие вопросы методики исследования колебаний элементов станка // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. Научно-технический сборник. – Краматорск: ДГМА, ЗАО “НКМЗ”, 1999. – С.100-110.
37. Данильченко Ю.А. Концептуальная модель формирования точности шпиндельных узлов металлорежущих станков // Вестник Тернопольского государственного технического университета. – 1999. – №1. – С. 124-128.
38. Дружинин И. В. Разработка концепции конкурентоспособных производственных систем на основе принципов системологии // СТИН. - 2000. - №8.

39. Дубров А. М., Мхитарян В. С, Трошин Л. И. Многомерные статистические методы. - М.: Финансы и статистика, 2003. - 352 с.

40. Дядя С.И., Внуков Ю.Н., Ковтун Е.Г. Управление точностью металлорежущих станков// Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва.- К: НТТУ «КПІ», 1998.- Т.1.- С.110-115.

41. Експлуатація збірних різців: монографія / Клименко Г.П., Мироненко Є.В., Гузенко В.С., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – 83 с.

42. Епифанов В. В. Группирование деталей типа тел вращения с применением кластерного анализа // Машиностроитель. — 2004. - № 2. — С.34 — 38.

43. Епифанов В. В. Разработка классификационной системы для автоматизации технологической подготовки группового производства // Машиностроитель. -2001.-№ 9.-С. 33-35.

44. Еськов А.Л., Хае Г.Л., Зуева Л.М. Многокритериальная оптимизация процесса механообработки с учетом его стабильности и трудового потенциала станочников// Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорск: ДГМА, 1997.- С.147-156.

45. Залога В. А. К вопросу о перспективах совершенствования механической обработки материалов резанием на современном этапе развития машиностроения // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. Збірник праць з 4х т.- Т. 1. – Київ:НТУУ, КПІ – 1998. – С. 304 – 308.

46. Зорев Н. Н. Развитие науки о резании металлов / Н. Н. Зорев, Г. И. Грановский, М. Н. Ларин. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.

47. Зыков А. А. Основы теории графов.-М.: Наука, 1987.— 384 с.

48. Иноземцев Г. Г., Мартынов В. В., Бровкова М. Б. Оптимизация процесса резания с учетом диагностического состояния оборудования. // Станки и инструмент-1999. N12. -с.9-13.

49. Иноземцев А. Н. Надежность станков и станочных систем / А. Н. Иноземцев, Н. И. Пасько Н.И. – Тула: ТулГУ, 2002. – 192 с.
50. Использование экспертной системы для выбора компоновки станка. Станки и инструмент. Каминская В.В., Панышев Н.Н., Гринглаз А.В., Колупаев А.А. 1984. №4. С. 12-14.
51. Классификатор ЕСКД. Классы 71, 72, 73, 74, 75. Иллюстрированный определитель деталей. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 401 с.
52. Клименко Г.П. Обеспечение надежности технологической системы при определении режимов резания // Современные технологии машиностроения. Прогрессивные методики преподавания. - Сумы. - 1997.-Вып. 1.-С.57-59.
53. Клименко Г.П. Анализ условий обработки деталей на тяжелых станках на основе информационного банка данных //Высокие технологии в машиностроении «Интерпартнер - 97».- Харьков: ХГПУ, 1997.- С.
54. Клименко Г.П. Определение ограничений на режимы резания при оптимизации регламентов эксплуатации инструмента на тяжелых станках / Клименко Г.П., Васильченко Я.В., Ткаченко Н.А. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. - Краматорськ: ДДМА.– 2003. – Вип. 14. – С.29-35
55. Ключко А.А., Кравцов А.Н., Суслов А.Г., Соломцев Ю.М. — Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014. — 293 с. — (Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении) — ISBN 978-5-906703-02-6.
56. Ключко А.А. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А.А. Ключко, Е.В. Мироненко, О.А. Анцыферова., Л.А. Макатрова., В.Е.Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – Вып. 37. – С. 105–112.
57. Клушин М. И. Резание металлов. М.: Машгиз, 1958. - 454с.

58. Ковалев В.Д. Конструкции и эксплуатация тяжелых станков: / Бабин О.Ф., Пономарев Л.Д. // Учебное пособие. – Краматорск: - ДГМА, 2004. – 112 с.

59. Ковалев В.Д. Разработка методики управления режимами обработки на тяжелом токарном станке с помощью PLC модулей / Ковалев В.Д., Мельник М.С., Березовская И.К. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. № 35, 2014

60. Ковалев В.Д. Экспериментальные исследования формы стружки при глубоком сверлении стали и определение рациональных геометрических параметров стружкозавивательных канавок / Ковалев В.Д., Васильченко Я.В., Фишман А.А. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №23, 2012. – С. 62-68

61. Ковалев В.Д., Васильченко Я.В. Управление процессом обработки на тяжелых станках с помощью алгоритма оптимального регулирования// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА. – 2006. – Вип. 19. – С. 24-32.

62. Ковалев В. Д. Демпфирование колебаний в приводах подач тяжелых станков, с применением следящего привода на основе линейного двигателя с гидроусилителем / В. Д. Ковалев, О. Ф. Бабин, С. А. Гаков. – Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. (зб. наук. праць.) – Вип. 15. – Краматорськ-Київ: ДДМА, 2004. – С. 108–116.

63. Ковалев В.Д. Управление точностью траекторных перемещений гидростатических опорных узлов / В.Д. Ковалев, А.В. Пономаренко, Я.В. Васильченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство : зб. наук. праць. – Донецьк : ДонНТУ, 2009. – Вип. 6 (154). – С. 205-211.

64. Ковалев В.Д. Управление точностью шпиндельного узла тяжелого токарного станка / В.Д. Ковалев, А.В. Пономаренко, Я.В. Васильченко // Наукові нотатки : зб. наук. праць. – Луцьк : ЛНТУ, 2008. – Вип. 11. – С. 265–272.

65. Ковальов В.Д. Оптимізація режимів механічного оброблення виробів важкого машинобудування з врахуванням фактичного стану процесу в режимі реального часу / Ковальов В.Д., Васильченко Я.В. // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип. 4 / ред. кол. : В.О. Федорович (голова). – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – С.67-73.

66. Ковальов В.Д. Розробка системи управління якістю роботи важких верстатів і інструментів / Ковальов В.Д., Васильченко Я.В. // Сборник научных трудов. Качество, стандартизация. – Киев, 2014.

67. Ковальов В.Д. Система адаптивного управления работой тяжелого токарного станка / Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Мельник М.С. // Вісник СевНТУ. Серія "Машинобудування та транспорт". – 2011. – вип.118. – С.47-52.

68. Колесов И. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов / И. М. Колесов. – М.: Машиностроение, 1997. – 592 с., ил.

69. Креймер Г. С. Прочность твердых сплавов / Г. С. Креймер. – М.: Металлургия, 1966. – 200 с.

70. Кудинов В. А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 356 с.

71. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.А. Теорія технічних систем / Під. ред. Кузнецова Ю.М. – К.-Тернопіль: 1997. – 310с.

72. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., та інші. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: Монографія/Упоряд. Кузнецов Ю.М. – К.-Тернопіль: Терно-граф., 2011. – 692с., іл.

73. Линеаризация изотермической стационарной задачи смазывающих жидкостей высокоскоростных, тяжело нагруженных зубчатых передач тяжелых токарных станков с ЧПУ / В.Д. Ковалев, Е.В. Мироненко, А.А. Ключко, Е.В. Басова, Д.А. Кравченко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – Вып. 36. – С. 45–57.

74. Луців І. В. Оцінка впливу похибок комплексного самоналагоджувального оснащення на точність оброблюваних циліндричних поверхонь / І. В. Луців, В. Н. Волошин, В. М. Буховець // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні : збірник наукових праць. – 2016. – № 839. – С. 80–85. – Бібліографія: 7 назв.

75. Лысенко О. Триангуляционные датчики расстояния / О. Лысенко // Электронные компоненты. – М.: Компьютер пресс, 2005. – №11. С. 1-5.

76. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1966. – 264 с.

77. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. / А. Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

78. Математическое моделирование процесса компоновки металлообрабатывающих станков. Давыдов И.И., Лехмус М.Ю. В кн.: Программно-методические и программно-технические комплексы САПР и АСТ1Ш: Тезисы докл. н.-т. конф. Ижевск, 1988, с. 117-188.

79. Никифоров А. Д. и др. Процессы управления объектами машиностроения: Учеб.пособие для машиностроит. спец. вузов. / А. Д. Никифоров, А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров. – М.: Высшая школа, 2001. – 455 с.

80. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник: В 2-х т.: Т1 / А. Д. Локтев, И. Ф. Гущин, В. А. Батуев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с., ил.

81. Пасько Н. И. Надежность станков и автоматических линий / Н. И. Пасько. – Тула: ТЛИ, 1979. – 106 с.

82. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. – УкрДНІАТ, Київ, 2004.-383с.

83. Петраков Ю.В., Амин Афшар Камбиз Оптимизация токарной обработки. Сб. Вестник Национального технического университета Украины «КПИ», №52, 2008.

84. Подураев В. М. Прогнозирование стойкости режущего инструмента / В. М. Подураев, В. В. Закураев, В. С. Карякин // Вестник машиностроения. – 1993. – № 1. – С. 23–26.

85. Подураев В. Н. Разработка и реализация способа управления оптимальным режимом резания / В. Н. Подураев, В. В. Закураев // Вестник машиностроения. – 1996. – № 11.

86. Подураев В. Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В. Н. Подураев, А. А. Борзов, В. А. Горелов. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.

87. Потапов В. А. Итоги развития мирового станкостроения в 1996 г. // СТИН. -1997.-№9.-С.29-33.

88. Потапов В. А. Токарные станки и токарные центры на выставке в Ганновере // Машиностроитель. - 2002. - №5. - С. 50.

89. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем /Под ред. Проникова А.С. – М.: Машиностроение, 1994. - Т. 1. - 445с.

90. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем /Под ред. Проникова А.С. – М.: Машиностроение. - 1995.- Т. 2. - Ч. 1. - 370с.

91. Пуш А. В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем // СТИН. -2000. - №9. - С. 12.

92. Равская Н.С., Клименко Г.П. Качество процесса эксплуатации режущего инструмента на тяжелых станках/ 6 International Conference on advanced Mechanical Engeniring and Technology AMTECH 2001 Beyond 2001.- p.136-144.

93. Равская Н.С., Клименко Г.П. Определение конструктивных параметров инструмента с учетом вероятностного характера его нагружения // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем.- Краматорськ: ДГМА, 2001.- С.20-24.

94. Равская Н.С., Родин П.Р., Дюбнер Л.Г., Скрынник П.В. Оптимизация конструктивных параметров инструментов на основе экспериментальных исследований / Вопросы механики и физики процессов

резания и холодного пластического деформирования. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев: ИСМ, 2002.- С.332-336.

95. Решетов Д. Н. Детали и механизмы металлорежущих станков. Шпиндели и их опоры механизмы и детали приводов (том 2) / Д. Н. Решетов, В. В. Каминская, А. С. Лapidус, и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.

96. Рийвес Ю. Э. Применение множества приоритетов для выбора модели станка// Автоматизация технологического проектирования процессов механической обработки. ТПИ. Таллин. - 1980. - С. 45 - 46.

97. Родічев Ю.М. Оцінка конструкційної міцності та особливостей руйнування модифікованих твердих сплавів / Родічев Ю.М., Сорока О.Б., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. № 34, 2014. – С.89-100.

98. Родічев Ю.М. Прискорене визначення опору руйнуванню і зношуванню різальних пластин при інтенсивному контактному навантаженні / Родічев Ю. М., Сорока О. Б., Ковальов В.Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. № 36, 2015. – С. 10-14.

99. Синепальников В. А. Зависимости процесса резания как случайные функции / В. А. Синепальников // Станки и инструменты, 1968. – № 7. – С. 38–39.

100. Соломенцев Ю. М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, С. П. Митрофанов. – М. : Машиностроение, 1980. – 536 с.

101. Сорока О. Б. Прогнозування втомної міцності твердих сплавів, оброблених імпульсним магнітним полем / Сорока О. Б., Родічев Ю. М., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №32, 2013. – С. 317-324.

102. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

103. Старков В. К. Оптимизация процесса резания по энергетическим критериям / В. К. Старков, М. В. Киселев // Вестник машиностроения. – 1989. – № 4. – С. 41–45.

104. Старков В. К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.

105. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія / В.Б. Струтинський, Д.Ю. Федориненко. – Ніжин: ТОВ „Видавництво „Аспект-Поліграф”, 2011. – 464 с.

106. Струтинський В.Б., Перфілов І.В. Вібраційні процеси механічної обробки: монографія. К.:Хімджест. - 2015. – 579с.

107. Струтинский В.Б., Ковалев В.Д. Определение дифференциальных параметров цилиндрических опор жидкостного трения // Вестник Национального технического Университета Украины «Киевский политехнический институт». - К.: Машиностроение, Вып.37. – 1999. - С. 7-12.

108. Струтинський В. Б. Математичне моделювання металорізальних верстатів: (Монографія) / В. Б. Струтинський, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 570 с.

109. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: підручник/ В. Б. Струтинський, П. П. Мельничук. – Ж.: ЖІТІ, 2002. – 570 с.

110. Таубе А. О., Плотников А. Л. Методика определения коэффициента C_v в автоматизированном способе расчета допустимой скорости резания. Межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. Волгоград, 2002. - С.35-41.

111. Твердосплавные инструменты в процессах механической обработки: монографія / Н.А.Бондаренко, А.И. Боримский, Я.В.Васильченко [и

др.]; Под. ред. М.В.Новикова и С.А.Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н.Бакуля, 2015. – 368 с. ISBN 978-966-02-7509-6.

112. Тейлор Ф. Искусство резать металл. – Изд. 2, – 1902 г.

113. Темчин Г. И. Теория и расчет многоинструментных наладок / Г. И. Темчин. – М.: Машгиз, 1957. – 557 с.

114. Теоретические предпосылки оптимального управления на станках с ЧПУ : монография / В. С. Гузенко, Г. Г. Коткин, А. А. Сердюк, В. Н. Черномаз; МОНМС Украины, Донбас. гос. машиностроит. акад. - Краматорск, 2011. – 136 с. - Библиогр.: 9 назв - рус.

115. Теория прогнозирования и принятия решений: Учебное пособие/ Под ред. С.А.Саркисяна. - М.: Высшая школа, 1977. - 351 с.

116. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. — М.: Изд-во стандартов, 1987.— 256 с.

117. Технология тяжелого машиностроения / Самойлов С.И., Горелов В.М., Браславский В.М. [и др.] ; под общ. ред. С.И. Самойлова. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1967. — 595 с.

118. Точность, надежность и производительность металлорежущих станков/ Григорьян Г.Д., Зелинский С.А. и др. - К.:Техника, 1990. - 222с.

119. Хаги С. К., Рас С. С. Детерминированные и вероятностные методы определения оптимальных режимов механической обработки // Конструирование и технология машиностроения. 1976. - №1. - с.295-302.

120. Хае́т Г. Л. Повышение эффективности обработки на тяжелых станках на основе исследований надежности, многокритериальной оптимизации параметров и режимов эксплуатации инструмента: дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Станкин, 1992. – 33 с.

121. Хае́т Г. Л. Прочность режущего инструмента / Г. Л. Хае́т. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.

122. Цирлин А. М. Оптимальные циклы и циклические режимы / А. М. Цирлин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с., ил.

123. Autorencollective. Entwicklungsstand des Information Zentrums für Schnitwerte (INFORS). Industrieanzeiger 989 (1974) Nr 92. s.2072/76
124. A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 57, June 2012, Pages 83–101
125. Ahmed A. D. Sarhan Adaptive neuro-fuzzy approach to predict tool wear accurately in turning operations for maximum cutting tool utilization 8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling – MATHMOD 2015 Volume 48, Issue 1, 2015, Pages 93-98
126. Aminfreier KSS// Technica (Suisse). 1997. 46. N13-14.- P.43-45.
127. Bernd Peukert, Mihir Saojia , Eckart Uhlmann An evaluation of building sets designed for modular machine tool structures to support sustainable manufacturing 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Emerging Potentials Volume 26, 2015, Pages 612-617
128. Bi Z. M. Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study / Bi, Z. M.; Wang, Lihui // Journal Of Manufacturing Systems, Vol: 31, 2012, P. 420-428.
129. Desforges, Xavier Design methodology for smart actuator services for machine tool and machining control and monitoring / Desforges, Xavier; Habbadi, Abdallah; Archimede, Bernard // Robotics And Computer-Integrated Manufacturing, Vol: 27, 2011, P. 963-976.
130. Frumusanu Gabriel R. Development of a stability intelligent control system for turning / Frumusanu, Gabriel R.; Constantin, Ionut C.; Marinescu, Vasile; Epureanu, Alexandru // International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, Vol: 64, 2013, P. 643-657.
131. G. Klimenko Evaluation Of A Level Of Quality Of Machining Process / G. Klimenko L. Ostankova, V. Kovalev, Y. Vasilchenko // 7th International Conference ICQM, 2012. – P. 51-61.
132. G. Urbicaina, J. A. Palaciosb , A. Fernández , A. Rodríguez , L. N. López de Lacallea , A. Elías-Zúñiga Stability prediction maps in turning of difficult-

to-cut materials The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013 Volume 63, 2013, Pages 514-522

133. Gostimirović, M., Kovač, P., Radovanović, M., Madić, M., Krajny, Z. MODULAR DESIGN OF UNCONVENTIONAL CUTTING MACHINE TOOLS JPE (2015) Vol.18 (1) p. 27-30

134. Graziano Arthur Sensor design and evaluation for on-machine probing of extruded tool joints / Graziano, Arthur; Schmitz, Tony L. // Precision Engineering- Journal Of The International Societies For Precision Engineering And Nanotechnology, Vol: 35, 2011, P. 525-535.

135. Haas G. What to look for in low-cost vertikal machining centers// Produktion (USA). - 1995. - № 5. - C 44.

136. Highspeed design ensures survival// Metallwork. Prod. - 1993. - C 359.

137. Hu Qiang Research on Machinability of the Shell Materials and Tools' Failure / Hu, Qiang ; Liu, Xianli; Yan, Fugang; Cheng, Yaonan ; Qiao, Shuai; He, Genghuang // Progress In Functional Manufacturing Technologies Iii Key Engineering Materials, Vol: 584, 2014, P. 38-44.

138. Kazinezy M. Ćpa criterion of single point tools then cutting with NC Machinentools. Int,J. Prod, Res, 1971, 9, №4. 101

139. Kovalev V. Adaptive optimal control of a heavy lathe operation / Kovalev V., Vasilchenko Y., Dašić P. // Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA), April 2014. – Vol. 4, Issue 4. – P. 269-275. ISSN 2159-5275.

140. Kovalev V. Adaptive optimal control of a heavy lathe operation / V. Kovalev, Y. Vasilchenko // 12th International Conference RaDMI 2012 from 13-17 September 2012, – Sokobanja (Serbia), 2012. – P.210-215.

141. Kovalev V. Cutting tool wear operating on heavy lathe / V. Kovalev, G. Klimenko, Y. Vasilchenko, M. Tkachenko // 10th International Conference RADMI 2010 from 16-19 September , 2010, – Donji Milanovac (Serbia), 2010. – P. 287–293.

142. Kovalev V. Development of the integral complex of optimal control of heavy machine tools adaptive technological system for wind-power engineering parts / V. Kovalov, Y. Vasilchenko, P. Dasic // 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE

INTERDISCIPLINARITY IN ENGINEERING, INTER-ENG 2014 : Procedia Technology, – Trstenik (Serbia), 2015. – Vol.19. – P.145-152.

143. Kovalev V. Evaluation of a level of quality of manufacturing process on heavy engineering enterprises / Viktor D. Kovalev, Yana V. Vasilchenko, Dejan T. Riznić // Annals of The University of Oradea Fascicle of Management and Technological Engineering Issue2, August 2014. – Vol.XXIV (XIV), Issue 3. – P.1-7. <http://www.imtuoradea.ro/auo.fmte/>

144. Kovalev V. Operation modeling of adaptive spindle blocks of heavy lathers / V. Kovalev, Y. Vasilchenko, T. Kosovskaya // 12th International Conference RaDMI 2012 from 13-17 September 2012, – Sokobanja (Serbia), 2012. – P.221-229.

145. Kovalev V. Prospect of adaptive control of technological system on the base of heavy machine-tools / V. Kovalev, Y. Vasilchenko, A. Makarkina // Zeszyty naukowe politechniki rzeszowskie, Mechanika, 2009 – Z.77, №269,. – P.34-44.

146. Kovalev V. Prospects of adaptive control on the base of heavy machine tools / V. Kovalev, Y. Vasilchenko, A. Makarkina // Les problèmes contemporains du technosphere et de la formation des cadres d'ingénieurs – Sousse (Tunisie), 2009. – P.101-104.

147. Kovalev V. Research of Chip Breaking at New Ways of Deep Drilling / V. Kovalev, Y. Vasilchenko, A. Makarkina // 7 International conference RADMI – Belgrad (Serbia), 2007. – P.202-208

148. Kovalev V. Statistical researches of work of the enterprises of heavy mechanical engineering for a substitution of technical characteristics of new machine tools / V. Kovalev, Y. Vasilchenko // 11th International Conference RaDMI 2011 from 15-18 September 2011, – Sokobanja (Serbia), 2011. – P.359-364.

149. Kovalev V. The exactness management of the heavy metal-cutting equipment/ V. Kovalev, O. Ponomarenko, Y. Vasilchenko, M. Tkachenko // RADMI 2009 Proceedings, – Belgrad (Serbia), 2009. – Vol.1. – P.251-256.

150. Kovalev V., Strutinskiy V. The concept of adaptive-controlled influence on the technological system / Proceedings of 6 International Conference on Advanced

Mechanical Engineering Technology –AMTECH’2001. –Plovdiv, Bulgaria. -2001. - Vol.III. -P.249-256.

151. Kovalov V. Trends of adaptive control of accuracy of the technological systems on the basis of heavy machine-tools. / V. Kovalov, O. Ponomarenko, Y. Vasylenko // 2nd International Conference «ICQME 2007». – Budva, Montenegro, 2007. – P. 263–275.

152. L. Ostankova Optimization Investment Strategies Uncertain And Risk / L. Ostankova, N. Shevchenko, V. Kovalev, Y. Vasilchenko // 7th International Conference ICQM, 2012. – P. 83-91.

153. Li Dianxin An identification method for key geometric errors of machine tool based on matrix differential and experimental test / Li, Dianxin; Feng, Pingfa; Zhang, Jianfu; Yu, Dingwen; Wu, Zhijun // Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part C-Journal Of Mechanical Engineering Science, Vol: 228, 2014, P. 3141-3155.

154. LianWandee. a.// Zhizaojishuyujichuang. Manuf. Technol. and Mach. Tool. - 1994.-N 5.-C. 52-54.

155. Liu Quan Identification and optimal selection of temperature-sensitive measuring points of thermal error compensation on a heavy-duty machine tool / Liu, Quan; Yan, Junwei; Duc Truong Pham; Zhou, Zude; Xu, Wenjun; Wei, Qing; Ji, Chunqian // International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, Vol: 85, 2016, P. 345-353.

156. Liu Quan Identification and optimal selection of temperature-sensitive measuring points of thermal error compensation on a heavy-duty machine tool / Liu, Quan; Yan, Junwei; Duc Truong Pham; Zhou, Zude; Xu, Wenjun; Wei, Qing; Ji, Chunqian // International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, Vol: 87, 2016, P. 1237-1246.

157. Machining Data Handbook. Machinability Data Center Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, 1972

158. Mao Xinyong A complete methodology for identifying dynamics of heavy machine tool through operational modal analysis / Mao, Xinyong; Yan,

Ruizhi; Cai, Hui; Li, Bin; Luo, Bo; He, Songping // Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part B-Journal Of Engineering Manufacture, Vol: 230, 2015, P. 1406-1416.

159. Onozuka Hideaki Optimal Design of a Damped Arbor for Heavy-Duty Machining of Giant Parts / Onozuka, Hideaki; Utsumi, Koji; Kato, Tomu; Takahashi, Hayato; Obikawa, Toshiyuki // Journal Of Advanced Mechanical Design Systems And Manufacturing, Vol: 7, 2013, P. 171-186.

160. Sata T.N., Fujita Y., Hiramatsa, K. Kokubo and M.Takeyama. The present stage and future of the Machinability Data Service in Japan. Proceedings of the Fourteenth International Machine Tool Decision and Research Conference, 1973.

161. . Song JL, Ting KL Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained // Materials Science and Engineering :, Volume 499, Issues 1-2, 15 January 2009, P. 225-229

162. Tomáš Bakša*, Tomáš Kroupa, Pavel Hanzl, Miroslav Zetek Durability of Cutting Tools during Machining of Very Hard and Solid Materials 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014 Volume 100, 2015, Pages 1414-1423

163. Trends in machine tool inventory over past seven surveys// Metallworking Engeneering and Marketing. - 1998. - № 6. P. 128 - 135.

164. Utku Olgun and Erhan Budak Machining of Difficult-to-Cut-Alloys Using Rotary Turning Tools 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO) Volume 8, 2013, Pages 81-87.

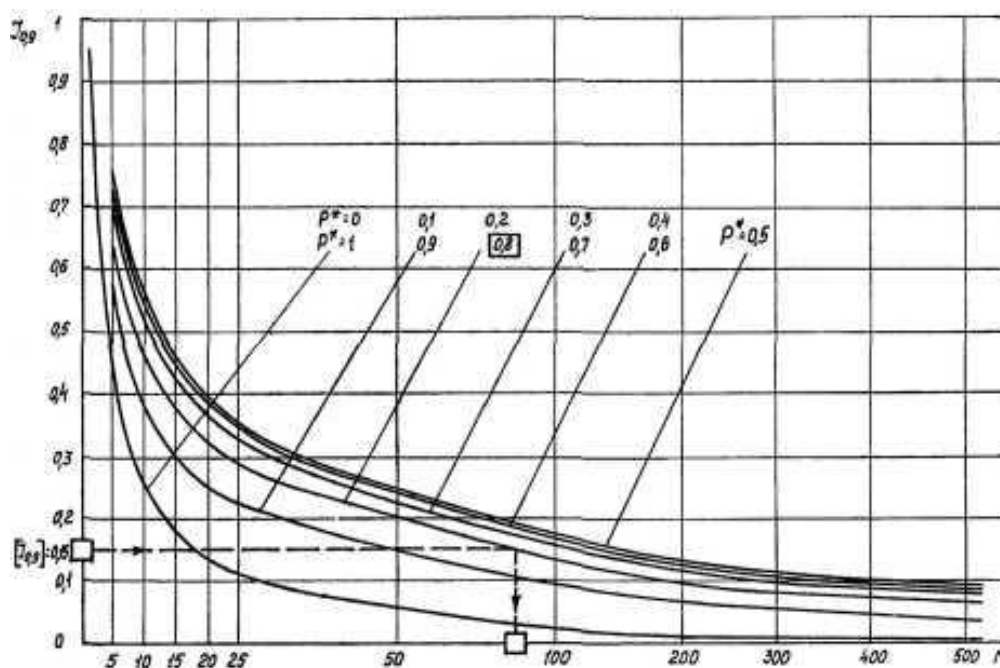
165. Wanderson de Oliveira Leitea Correcting geometric deviations of CNC Machine-Tools: An approach with Artificial Neural Networks Applied Soft Computing / Wanderson de Oliveira Leitea, Juan Carlos Campos Rubiob, Jaime Gilberto Duduchc, Paulo Eduardo Maciel de Almeida // Volume 36, November 2015, P. 114–124.

166. Xiong Yao Machining process parameters optimization for heavy-duty CNC machine tools in sustainable manufacturing / Xiong, Yao; Wu, Jun; Deng,

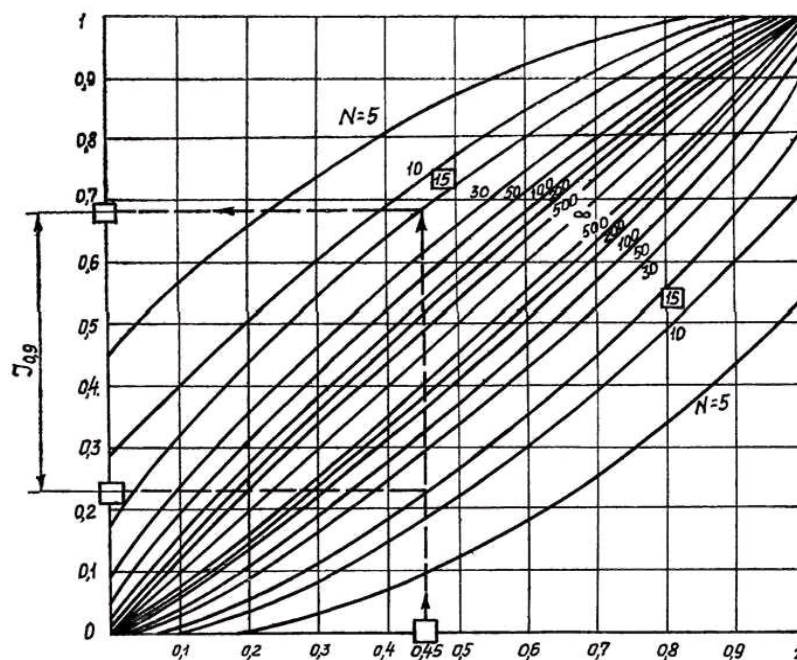
Chao; Wang, Yuanhang // International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, Vol: 87, 2016, P. 1237-1246.

167. Yan Wei A Kind of Optimization model on turning process Based on productivity and cost / Yan, Wei; Fan, Jun; Guo, Xufeng // Advances In Materials And Materials Processing, Pts 1-3. Advanced Materials Research, Vol: 652-654, 2013, P. 2214-2217.

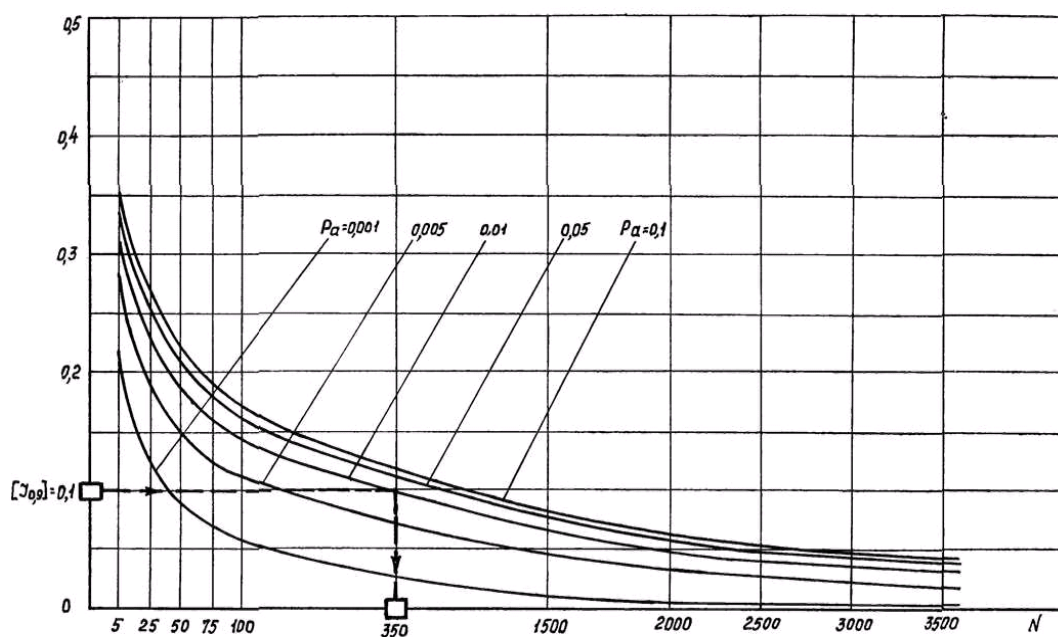
НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ



Номограмма для расчета необходимого объема выборки N
в зависимости от требуемой точности определения вероятности $[I_{0.9}]$
и ее статистической оценки P^*



Зависимость верхнего и нижнего доверительных пределов для вероятности P
в зависимости от ее статистической оценки P^* и объема выборки N .
(коэффициент доверия $\beta = 0,9$)



Номограмма для расчета необходимого объема выборки N
 в зависимости от требуемой точности определения вероятности $[I_{0,9}]$
 и аппаратной вероятности P_a

Объем наблюдений N при распределении Вейбулла

Относительная ошибка	Доверительная вероятность	Объем наблюдений N при коэффициенте вариации v_T								
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
0,10	0,80		13	25	32	50	50	65	100	125
	0,90		32	50	65	100	125	150	200	250
	0,95		0	80	100	150	200	250	400	500
0,15	0,80	5	6	10	15	20	25	32	40	50
	0,90	6	5	25	32	40	65	80	80	125
	0,95	13	5	40	50	80	100	125	150	200
0,20	0,80	3	5	8	10	15	20	20	25	32
	0,90	6	10	15	20	32	40	40	50	65
	0,95	8	15	25	32	40	50	80	100	125

Функция нормального распределения $\Phi(x)$

X	0	1	2	3
0,00	0,500	0,841	0,9773	0,9987
0,05	0,520	0,853	0,9798	0,9989
0,10	0,540	0,864	0,9821	0,9990
0,15	0,560	0,875	0,9842	0,9992
0,20	0,573	0,885	0,9861	0,9993
0,25	0,599	0,894	0,9878	0,9994
0,30	0,618	0,9032	0,9893	0,9995
0,35	0,637	0,9115	0,9906	0,9996
0,40	0,655	0,9192	0,9918	0,9997
0,45	0,674	0,9265	0,9929	0,9997
0,50	0,692	0,9332	0,9938	0,9998
0,55	0,709	0,9394	0,9946	0,9998
0,60	0,726	0,9452	0,9953	0,9998
0,65	0,742	0,9505	0,9960	0,9999
0,70	0,758	0,9554	0,9965	0,9999
0,75	0,773	0,9599	0,9970	0,9999
0,80	0,788	0,9641	0,9975	0,9999
0,85	0,802	0,9678	0,9978	0,9999
0,90	0,816	0,9713	0,9981	0,9999
0,95	0,829	0,9744	0,9984	0,9999

Значение коэффициента Стьюдента $t_{\beta_1 N-1}$

(N-1)	β		
	0,80	0,90	0,95
2	1,886	2,920	4,303
3	1,638	2,353	3,182
4	1,533	2,132	2,776
5	1,476	2,015	2,571
6	1,440	1,943	2,447
7	1,415	1,895	2,365
8	1,397	1,860	2,306
9	1,383	1,833	2,262
10	1,372	1,813	2,228
11	1,363	1,796	2,201
12	1,356	1,782	2,179
13	1,350	1,771	2,160-
14	1,345	1,761	2,145
15	1,341	1,753	2,131

16	1,337	1,746	2,120
17	1,333	1,740	2,110
18	1,330	1,734	2,101
19	1,328	1,729	2,093
20	1,325	1,725	2,086
22	1,321	1,717	2,074
24	1,318	1,711	2,064
26	1,315	1,706	2,056
28	1,313	1,701	2,048
30	1,310	1,697	2,042
40	1,303	1,684	2,021
50	1,299	1,676	2,009
60	1,296	1,671	2,000
80	1,292	1,664	1,990
100	1,290	1,660	1,984
150	1,287	1,655	1,976

Значения коэффициента r_1

N	β		
	0,950	0,900	0,800
1	19,5	9,50	4,48
2	5,63	3,77	2,42
3	3,66	2,73	1,95
4	2,93	2,29	1,74
5	2,54	2,05	1,62
6	2,29	1,90	1,54
7	2,13	1,80	1,48
8	2,01	1,72	1,43
9	1,91	1,66	1,40
10	1,83	1,61	1,37
11	1,78	1,57	1,35
12	1,73	1,53	1,33
13	1,69	1,50	1,31
14	1,65	1,48	1,29
15	1,62	1,46	1,28
20	1,51	1,37	1,24
25	1,44	1,33	1,21
30	1,39	1,29	1,18
40	1,32	1,24	1,16
50	1,2	1,21	1,14
60	1,25	1,19	1,12
80	1,21	1,16	1,10
100	1,19	1,14	1,09

Значения коэффициента r_3

N	β		
	0,950	0,900	0,800
1	0,33	0,43	0,62
2	0,42	0,51	0,67
3	0,48	0,57	0,70
4	0,52	0,60	0,73
5	0,55	0,62	0,75
6	0,57	0,65	0,76
8	0,61	0,68	0,78
10	0,64	0,70	0,80
15	0,68	0,74	0,83
20	0,72	0,77	0,85
25	0,74	0,79	0,86
30	0,76	0,80	0,87
40	0,78	0,83	0,88
50	0,80	0,84	0,89
60	0,82	0,86	0,90
80	0,84	0,87	0,91
100	0,86	0,88	0,92

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРНОГО
АНАЛИЗА ДЕТАЛЕЙ ПАО НКМЗ

	Spreadsheet8 in энергетическое оборудование раб лист2					
	1 dnorm	2 dlnor	3 otvnor	4 CASE_NO	5 CLUSTER	6 DISTANCE
695095 Втулка	1,043298	0,339043	1,714982	1	1	0,90
695103 вал гребной	-1,41328	1,683417	-0,09596	2	3	0,38
695104 вал гребной	-0,15608	1,653465	-0,09596	3	3	0,43
695105 вал	-1,54821	3,095758	-0,39778	4	3	0,85
695112 вал	-0,15608	-0,59522	-0,33647	5	2	0,35
695119 вал	1,343142	0,549857	0,253025	6	1	0,47
695110 вал ротора	0,550696	0,507233	-0,92597	7	1	0,84
695121 вал	0,036677	-0,39455	-0,21857	8	2	0,45
695125 вал гребной	-1,41328	1,683417	-0,09596	9	3	0,38
695126 вал гребной	-0,15608	1,653465	-0,09596	10	3	0,43
695128 вал	0,636366	0,335587	-0,92597	11	1	0,78
695130 вал	-0,90569	0,931857	-0,92597	12	3	0,60
695131 втулка	1,064715	0,367842	2,469541	13	1	1,33
695138 вал	0,250852	-0,19663	-0,21857	14	1	0,52
695140 втулка	1,064715	0,367842	1,762142	15	1	0,94
695141 втулка	1,043298	0,339043	1,714982	16	1	0,90
695159 вал	-0,25032	1,929943	-0,92597	17	3	0,47
695160 вал	-0,89498	-0,04227	-0,92597	18	2	0,58
695164 цапфа	0,390065	-1,02745	0,017225	19	1	0,61
695165 корпус	-0,4238	-1,06178	0,715192	20	2	0,57
695166 труба	-0,92711	-0,43164	0,653884	21	2	0,46
695167 труба	-1,11986	-0,39708	0,229445	22	2	0,32
695168 труба	-1,11986	-0,639	0,229445	23	2	0,30
695169 труба	-1,11986	-0,5238	0,229445	24	2	0,30
695171 вал	0,636366	-0,70121	-0,33647	25	1	0,50
695172 вал	-0,86286	-0,83253	-0,50153	26	2	0,29
695174 бандаж	1,835743	-1,17813	0,490711	27	1	0,75
695178 фланец	-0,20748	-1,09081	0,191717	28	2	0,45
695179 фланец	-0,20748	-1,18412	0,653884	29	2	0,63
695180 цилиндр	1,634419	-0,73669	2,773722	30	1	1,53
695182 втулка	-0,1775	-1,08136	1,257531	31	2	0,89
695113 валок	1,171802	-0,42012	-0,92597	32	1	0,69
695114 валок	1,171802	-0,51228	-0,92597	33	1	0,70
695123 валок	1,171802	-0,42012	-0,92597	34	1	0,69
695124 валок	1,171802	-0,51228	-0,92597	35	1	0,70
695137 валок	1,171802	-0,51228	-0,92597	36	1	0,70
695156 вал	-0,96994	-0,35561	-0,92597	37	2	0,52
695173 вал	-1,11986	-0,77125	-0,92597	38	2	0,54
695176 вал	-1,11986	0,090212	-0,92597	39	2	0,66
695175 вал	-1,11986	0,090212	-0,92597	40	2	0,66

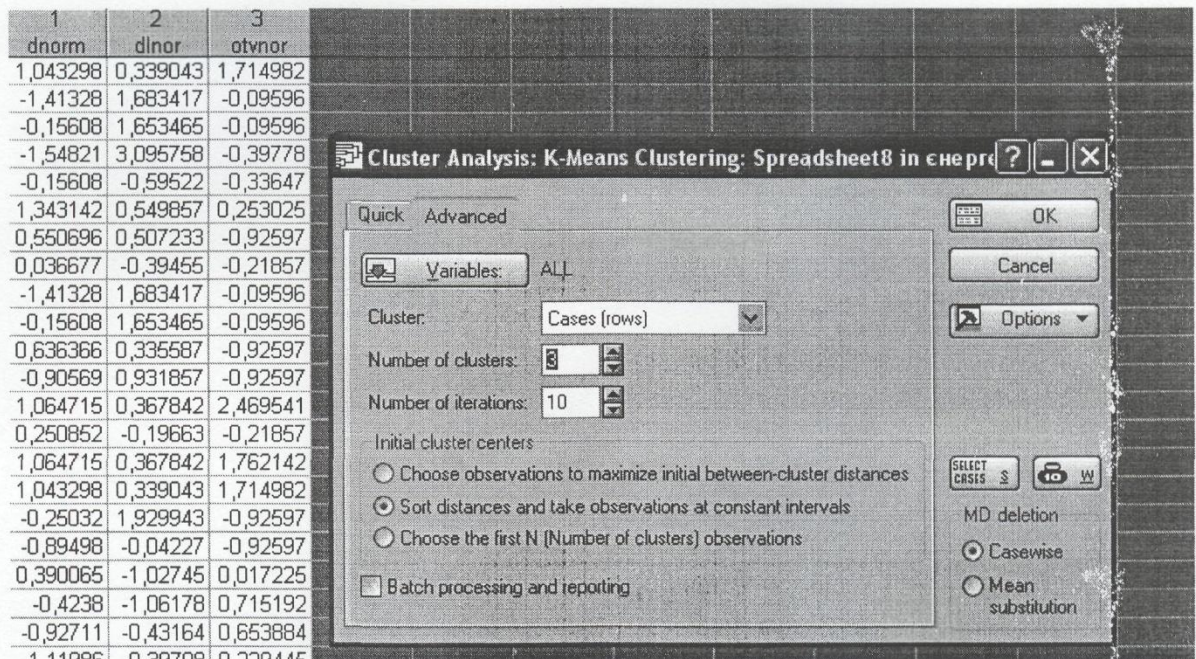
	Members of Cluster Number and Distances from Respect Cluster contains 7 cases		
	Distance		
695103 вал гребной	0,377692		
695104 вал гребной	0,432777		
695105 вал	0,851855		
695125 вал гребной	0,377692		
695126 вал гребной	0,432777		
695130 вал	0,596860		
695159 вал	0,468857		

Descriptive Statistics for Cluster 3 (Spreadsheet8 in энергетическое оборудование раб лист2)			
Cluster contains 7 cases			
Variable	Mean	Standard Deviation	Variance
dnorm	-0,834707	0,638516	0,407703
dlnor	1,804474	0,648014	0,419922
otvnor	-0,376223	0,391388	0,153185

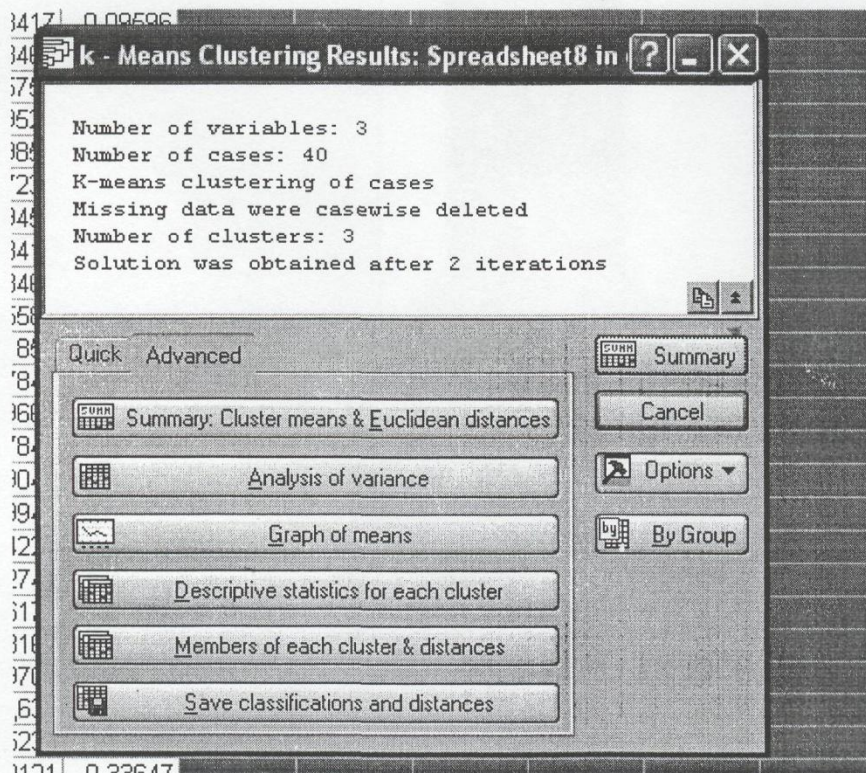
кнопка4

Members of Cluster Number 1 (Spreadsheet8 in энергетиче and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 17 cases	
	Distance
695095 Втулка	0,904353
695119 вал	0,471608
695110 вал ротора	0,835152
695128 вал	0,775821
695131 втулка	1,326037
695138 вал	0,518765
695140 втулка	0,935914
695141 втулка	0,904353
695164 цапфа	0,614578
695171 вал	0,495330
695174 бандаж	0,748389
695180 цилиндр	1,534061
695113 валок	0,693159
695114 валок	0,704831
695123 валок	0,693159
695124 валок	0,704831
695137 валок	0,704831

Members of Cluster Number 2 (Sp and Distances from Respective Cl Cluster contains 16 cases	
	Distance
695112 вал	0,353918
695121 вал	0,454533
695160 вал	0,579058
695165 корпус	0,571568
695166 труба	0,456604
695167 труба	0,315185
695168 труба	0,299912
695169 труба	0,299257
695172 вал	0,289380
695178 фланец	0,450618
695179 фланец	0,630571
695182 втулка	0,890516
695156 вал	0,516848
695173 вал	0,544156
695176 вал	0,656894
695175 вал	0,656894



кусок установки режимов



исходная инфа про кластеризацию

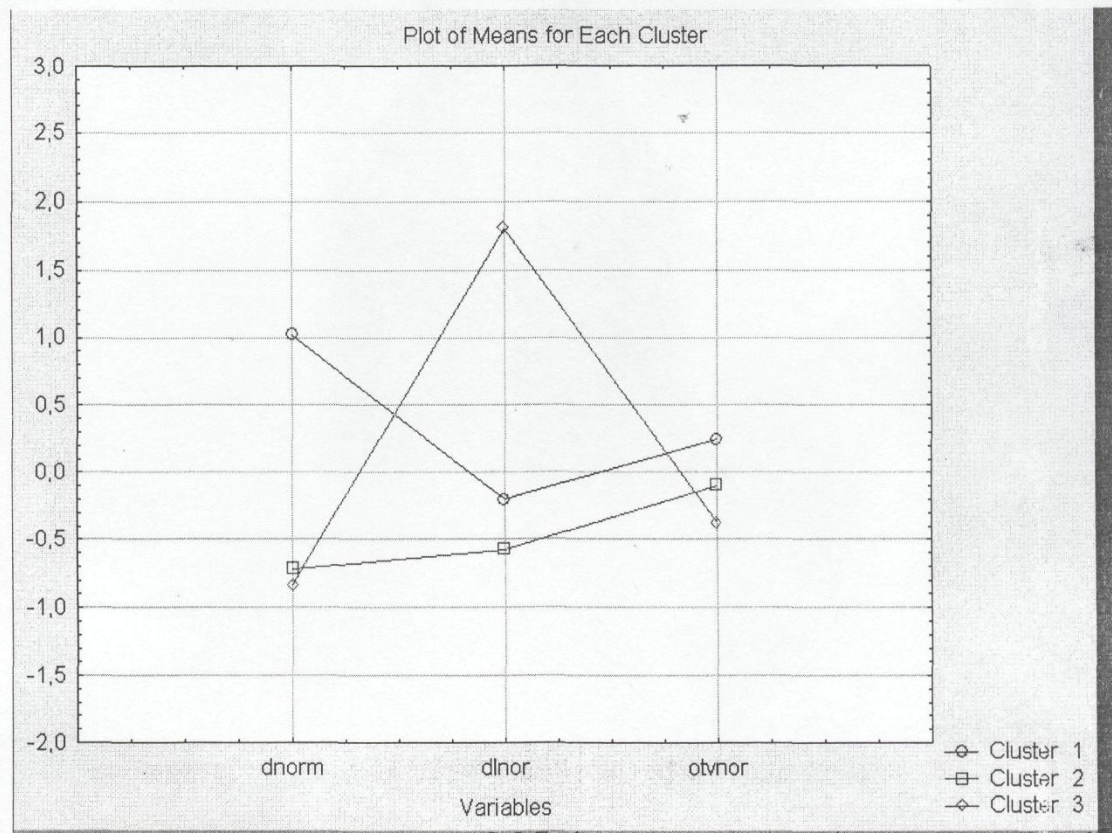
Analysis of Variance (Spreadsheet8 in энергетическое оборудование раб лист2)						
Variable	Between SS	df	Within SS	df	F	signif. p
dnorm	30,86947	2	8,13058	37	70,23918	0,000000
dlnor	28,79090	2	10,20910	37	52,17226	0,000000
otvnor	2,15405	2	36,84595	37	1,08153	0,349555

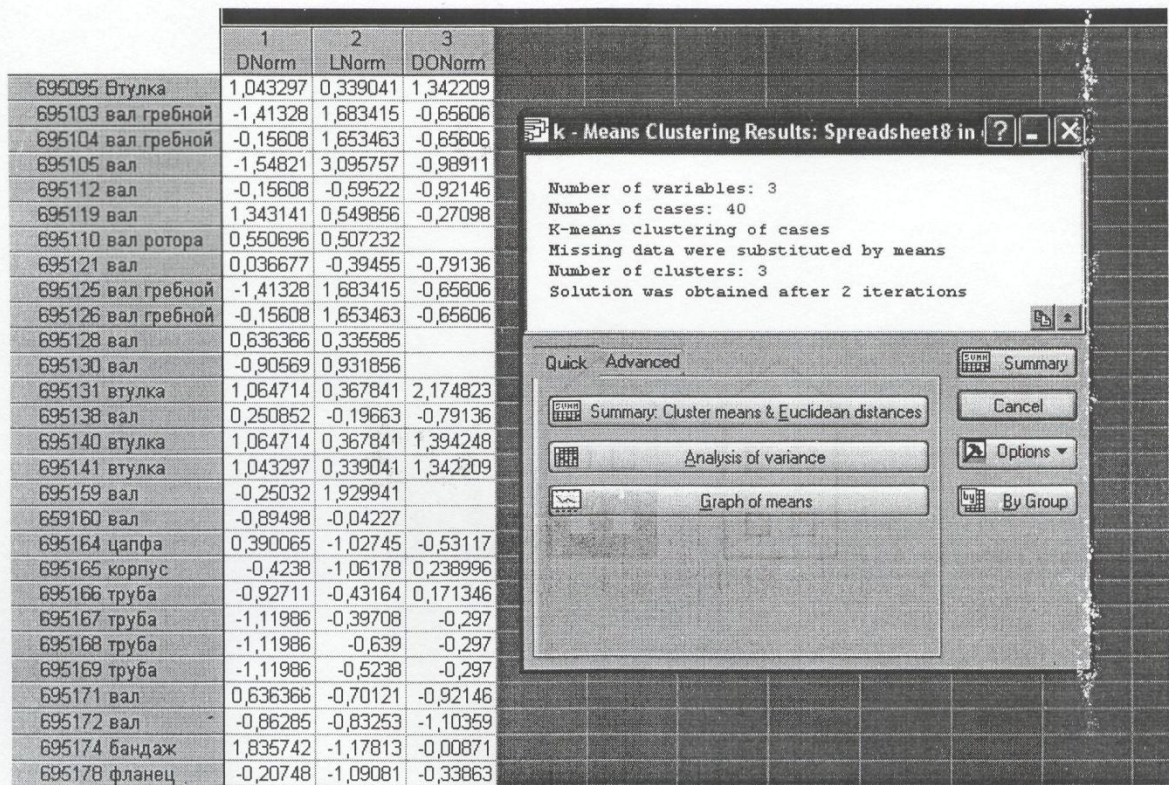
дисперс анализ кластеров

Cluster Means (Spreadsheet8 in энергетическое оборудование раб лист2)			
Variable	Cluster No. 1	Cluster No. 2	Cluster No. 3
dnorm	1,020746	-0,719359	-0,834707
dlnor	-0,200631	-0,576287	1,804474
otvnor	0,244675	-0,095369	-0,376223

Euclidean Distances between Clusters (Spreadsheet8 in энергетическое оборудование раб лист2)			
Distances below diagonal			
Squared distances above diagonal			
Cluster Number	No. 1	No. 2	No. 3
No. 1	0,000000	1,094904	2,616224
No. 2	1,046376	0,000000	1,920069
No. 3	1,617474	1,385666	0,000000

кнопка 1



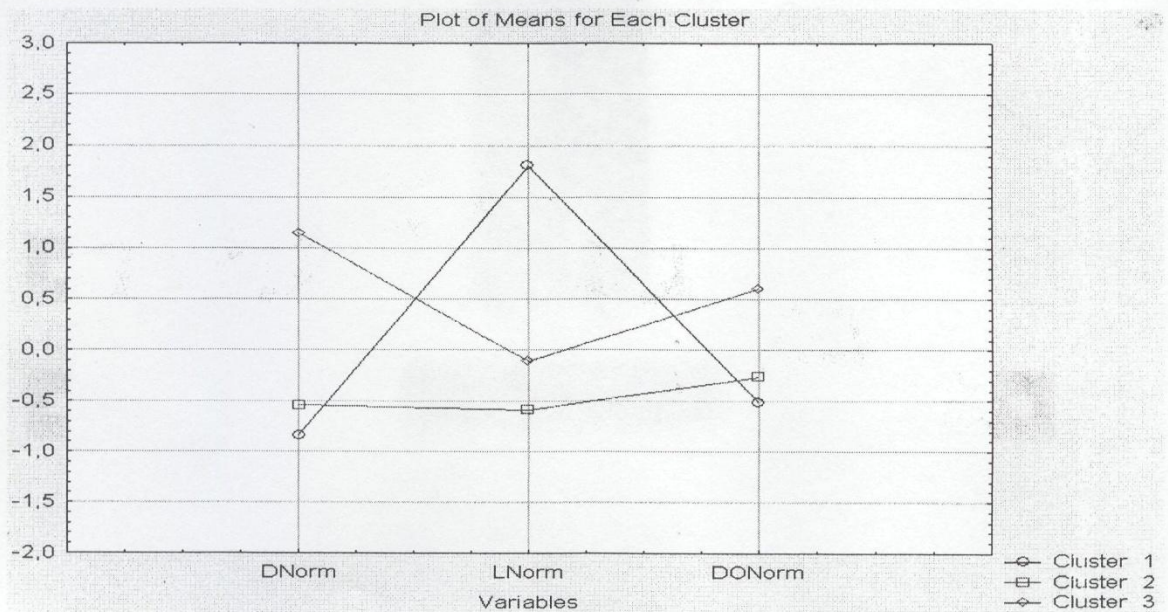


Euclidean Distances between Clusters (Spreadsheet8 in энергетическое оборудование раб лист)

Distances below diagonal

Squared distances above diagonal

Cluster Number	No. 1	No. 2	No. 3
No. 1	0,000000	1,957526	2,947253
No. 2	1,399116	0,000000	1,273291
No. 3	1,716756	1,128402	0,000000



АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
 ново-краматорський
 машинобудівний
 завод



JOINT-STOCK COMPANY
 NOVO-KRAMATORSKY
 MASHINOSTROITEL'NY
 ZAVOD

НКМЗ, м. Краматорськ, Донецька область, 84305, УКРАЇНА
 Phone: +38 (06264) 7-80-49, fax: +38 (06264) 7-30-60

NKMZ, Kramatorsk city, Donetsk region, 84305, UKRAINE
 E-mail: vtf@nkmz.donets.ua, http://www.NKMZ.com

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Генеральний директор
 ЗАТ "Новокраматорський
 машинобудівний завод"

Г.С. Суков

» _____ 2010 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво

Даний акт підтверджує, що на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи Васильченко Яни Василівни в ЗАТ "Новокраматорський машинобудівний завод" впроваджена з економічним ефектом 361700 грн. адаптивна технологічна систем для виготовлення великогабаритних деталей у важкому машинобудуванні, система прийняття рішень при адаптивному керуванні процесом механічної обробки на важких верстатах з урахуванням стану інструменту в технологічних системах оптимального регулювання, критерії оптимізації й обмеження на керовані параметри процесу механічної обробки на важких верстатах, елементи системи штучного інтелекту для автоматичного керування процесами різання на адаптивному обладнанні, нормативи режимів різання для важких верстатів.

Головний інженер
 ЗАТ "Новокраматорський
 машинобудівний завод"

О.І. Волошин

Генеральний директор
БАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування»



С.М. Нікогосян

АКТ

на впровадження науково-дослідної роботи, яку виконано за договором про науково-технічне співробітництво між БАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» та и Донбаською державною машинобудівною академією

1. У відповідності з планом впровадження результатів наукових досліджень повністю впроваджена науково-дослідна робота «Підвищення точності важких верстатів на основі розробки вузлів та систем адаптивного управління», яку виконано Донбаською державною машинобудівною академією з 18 лютого 2003 г по 20 червня 2008 р.
2. Короткий зміст роботи: Розроблена система адаптивного керування процесом механічної обробки на важких верстатах з урахуванням стану інструменту, яка враховує такі інформаційні канали: силові фактори процесу різання, вплив параметрів різального інструменту у процесі обробки на температуру в зоні різання; стан різального інструменту і процесу різання по вібраційних і акустичних характеристиках процесу різання; адаптивне регулювання процесу різання за сигналами акустичної емісії; адаптивне регулювання процесу різання за геометричними вимірами розмірів оброблюваної деталі в процесі обробки; адаптивне регулювання процесу різання за виміром зносу різального інструменту у процесі різання; вплив ОІМП на підвищення експлуатаційних характеристик різального інструменту; визначення якості різального інструменту методом ОІМП. Розроблена та реалізована система прийняття рішень при адаптивному керуванні процесом механічної обробки на важких верстатах з урахуванням стану інструменту в технологічних системах оптимального регулювання. Розроблені заходи щодо підвищення працездатності різального інструменту. Визначені шляхи підвищення експлуатаційних властивостей різальних інструментів для важких верстатів.
3. Розроблена практична конструкція системи адаптивного керування для управління точністю обробки, діагностики та підвищенню ефективності на важкому токарному верстаті. Розроблені математичні моделі, які описують поведінку системи. Проведені натурні іспити розробленої системи на важких токарних верстатах моделей КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3.
4. Найменування об'єкта, де впроваджена робота: важки токарні верстати моделі КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3.
5. Характер и найважливіші результати впровадження: використання системи адаптивного керування процесом обробки валків прокатних станів на важкому токарному верстаті КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3 дозволило підвищити продуктивність та точність обробки, знизити видаток різального інструменту. В рамках роботи впроваджена система адаптивного керування продуктивністю та точністю обробки на важких верстатах. Річний економічний ефект склав сто вісім тисяч грн на один верстат.
6. Дата впровадження: 21 червня 2008г.

Заступник генерального директора
з економіки

Науковий керівник

В.І. Чердніченко

Я.В. Васильченко



Генеральний директор
ТОВ "ТСС-ТЯЖСТАНКОСЕРВІС"
В. А. Кулік

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В.

Згідно програми робіт по підвищенню ефективності використання верстатного обладнання к.т.н., доц. Васильченко Я.В. були проведені дослідження верстатного обладнання, різального інструменту та процесу різання деталей на важких верстатах.

За результатами досліджень здійснено:

1. Розроблена система адаптивного керування процесом механічної обробки на важких верстатах з урахуванням стану інструменту, яка враховує такі інформаційні канали:
 - силові фактори процесу різання;
 - впливу параметрів різального інструменту у процесі обробки на температуру в зоні різання;
 - стану різального інструменту і процесу різання по вібраційних і акустичних характеристиках процесу різання;
 - адаптивне регулювання процесу різання за сигналами акустичної емісії;
 - адаптивне регулювання процесу різання за геометричними вимірами розмірів оброблюваної деталі в процесі обробки;
 - адаптивне регулювання процесу різання за виміром зносу різального інструменту у процесі різання;
 - вплив ОІМП на підвищення експлуатаційних характеристик різального інструменту;
 - визначення якості різального інструменту методом ОІМП.
2. Розроблена та реалізована система прийняття рішень при адаптивному керуванні процесом механічної обробки на важких верстатах з урахуванням стану інструменту в технологічних системах оптимального регулювання.
3. Розроблені заходи щодо підвищення працездатності різального інструменту.
4. Визначені шляхи підвищення експлуатаційних властивостей різальних інструментів для важких верстатів.
5. Використання системи адаптивного керування процесом обробки валків прокатних станів на важкому токарному верстаті 1К675Ф3 дозволило підвищити продуктивність та точність обробки, знизити видаток інструменту. В рамках роботи впроваджена система адаптивного керування продуктивністю та точністю обробки на важких верстатах. Річний економічний ефект склав сто сорок шість тисяч грн. на один верстат.
6. Дата впровадження 25 грудня 2009 р.

Заступник Генерального директора
ТОВ "ТСС-ТЯЖСТАНКОСЕРВІС"

І.С.Коваленко